



Escuela Universitaria de
Ingeniería Técnica de
Telecomunicación



Proyecto Fin de Carrera

Estudio Acústico del Teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada

Autor: Cristina Herranz Macías

Tutor: Juan Sancho Gil

Septiembre 2013



PROYECTO FIN DE CARRERA PLAN 2000

E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

TEMA: Estudio Acústico del Teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada

TÍTULO: Estudio Acústico del Teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada

AUTOR: Cristina Herranz Macías

TUTOR: Juan Sancho Gil

Vº Bº.

DEPARTAMENTO: DIAC

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Manuel Vázquez Rodríguez

VOCAL: Juan Sancho Gil

VOCAL SECRETARIO: Javier Sánchez Jiménez

DIRECTOR:

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario,

RESUMEN DEL PROYECTO:

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es realizar el estudio y simulación de la características acústicas del teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada.

El uso del recinto está destinado principalmente a representaciones teatrales, empleándose también como sala polivalente, de forma que se analiza su comportamiento acústico e idoneidad ante la variedad de usos a los que se destina.

Para ello, se realizan medidas experimentales in situ de todos los parámetros representativos de un recinto acústico y la predicción de los mismos mediante la simulación de la sala a través del software de simulación acústica EASE, de forma que las características acústicas obtenidas mediante ambos procesos sean comparadas y tras su análisis proponer mejoras en el entorno para cumplimiento de parámetros acústicos óptimos que se puedan exigir a esta sala.

RESUMEN

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es realizar el estudio de las características acústicas del Teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada mediante medidas y con el apoyo de los resultados obtenidos mediante la simulación del campo sonoro.

El recinto está destinado principalmente a representaciones teatrales, empleándose también como sala polivalente, de forma que se analizará su comportamiento acústico e idoneidad ante la variedad de usos a los que se destina.

Para ello, se realizan medidas experimentales *in situ* de todos los parámetros representativos de un recinto acústico y la predicción de los mismos mediante la simulación de la sala a través del software de simulación acústica EASE, de forma que las características acústicas obtenidas mediante ambos procesos sean comparadas proponiéndose mejoras en el entorno para cumplimiento de parámetros acústicos óptimos exigibles a la sala.

En primer lugar se exponen los principales conceptos teóricos a tener en cuenta en el ámbito de la acústica, detallando las diferentes teorías de estudio, los principios básicos de la psicoacústica.

Además, se definen los criterios utilizados en el diseño de recintos acústicos y parámetros que definan la calidad según el uso al que se destine en función del estudio de la utilización habitual de la sala y valores óptimos de los parámetros acústicos correspondientes a salas de tamaño y uso similar.

A continuación, se describe la metodología aplicada para la realización de las medidas *in situ* obteniendo resultados de los parámetros acústicos representativos del recinto para el análisis de sus características acústicas y posterior comparación con la predicción de los mismos mediante la simulación del modelo informático.

También se muestra el proceso que se ha seguido para el diseño del modelo acústico a partir de los planos del teatro y medidas realizadas en el recinto, para la simulación de parámetros y características acústicas.

Finalmente se exponen las conclusiones extraídas tras el estudio realizado y la propuesta de mejoras en el entorno para cumplimiento de parámetros acústicos óptimos que se puedan exigir a esta sala, incluyendo un presupuesto que muestre la viabilidad económica del proyecto.

ABSTRACT

The goal of this final project, is to perform an acoustic study and simulation of the Tomás y Valiente theatre in Fuenlabrada.

These premises are mainly used for stage plays, but also as a multipurpose space, therefore its acoustic behaviour and suitability for the expected uses will be analyzed.

To accomplish this task, experimental measures for all the representative parameters for an acoustic hall, will be taken on site. The prediction for those measurements will be simulated through EASE software, so the acoustic characteristics obtained using both methods will be compared, and improvements will be proposed in order to achieve the best acoustic parameters, the hall can have.

First at all, the theoretical concepts definition involves exposing the main concepts to consider in the acoustics field, detailing the basic principles of the psychoacoustic.

On top of the criteria used in the design of acoustic enclosures and parameters defining the quality according to the use the enclosure is intended for. Research on the most common usage for the space, and optimal values, comparing it with similar rooms in size and use.

Experimental measures are made of the acoustic parameters representative of the enclosure for the analysis of its acoustic characteristics and its later comparison with the prediction of the parameters through informatics model simulation.

Also the process which has been followed for the design of acoustic model of the theater are taken from on site measurements, experimental representative measures and acoustic parameters, for the acoustic characteristics analysis and post comparison with the software model simulation and prediction. Acoustic design of the theater taking as a base the building blueprints, and manual measures, for the parameters and acoustic characteristics simulation.

Finally, the conclusions extracted after the performed research are shown and the propose of improvements in the environment for fulfillment of acoustic optimal parameters which can be required to this room, including a quote with shows the economical viability of the project.

AGRADECIMIENTOS

*A mi tutor Juan,
por su ayuda y haber perdido tanto tiempo conmigo.*

*A mis padres y a mi familia,
porque sin ellos no hubiese podido llegar hasta aquí.*

*A mis hermanas Nieves y Olga,
que son las mejores y me han ayudando tanto.*

*A mis amigos de la universidad,
sobre todo a Cristi y a Sari,
gracias a vosotras estos años han sido los más divertidos.*

*A mis compañeros del trabajo,
por sus consejos y tan buenos ratos.*

*A mi churri Álvaro,
porque tu apoyo durante todo este tiempo ha sido lo más importante.*

Gracias



ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Estructura	1
CAPÍTULO II.....	3
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Propagación del sonido en recintos cerrados	5
2.1.1 Análisis de parámetros	7
2.1.1.1 Potencia acústica.....	8
2.1.1.2 Constante de la sala	8
2.1.1.3 Directividad de la fuente	8
2.1.1.4 Distancia entre la fuente y el receptor.....	9
2.2 Teorías acústicas	10
2.2.1 Teoría estadística	11
2.2.1.1 Coeficiente de absorción sonora.....	11
2.2.1.2 Tiempo de reverberación.....	12
2.2.2 Teoría geométrica.....	15
2.2.2.1 Leyes geométricas de la propagación	16
2.2.2.2 Fuentes imagen	18
2.2.2.3 Reflexiones sobre superficies curvas.....	20
2.2.3 Teoría ondulatoria	21
2.2.3.1 Ecuación de onda	21
2.2.3.2 Modos propios	23
2.2.4 Psicoacústica.....	26
2.2.4.1 Sistema auditivo	26
2.2.4.2 Sonoridad.....	28
2.2.4.3 Localización suma	29
2.2.4.4 Ley del primer frente de onda	30
2.2.4.5 Enmascaramiento.....	30
2.2.4.6 Umbral de eco	31
2.3 Características de la palabra	32
2.3.1 Fisiológicas	32
2.3.2 Temporales.....	32
2.3.3 Espectros y niveles	32
2.3.4 Directividad	33





CAPÍTULO III.....	35
3. PARÁMETROS PARA LA VALORACIÓN ACÚSTICA DE SALAS.....	37
3.1 Nivel de presión sonora	37
3.2 Tiempo de reverberación	38
3.2.1 Brillo	39
3.2.2 Calidez.....	40
3.2.3 Tiempo de caída inicial.....	40
3.3 Respuesta al impulso	41
3.3.1 Intimidad acústica.....	41
3.4 Factor de fortaleza.....	42
3.5 Análisis de reflexiones	43
3.5.1 Definición.....	43
3.5.2 Claridad.....	44
3.6 Sensación espacial.....	45
3.6.1 Índice de difusión sonora	45
3.6.2 Coeficiente de correlación Cruzada Interaural.....	45
3.6.3 Eficiencia lateral.....	46
3.7 Inteligibilidad	47
3.7.1 Índice de Transmisión de la Palabra	47
3.7.2 Pérdida de Articulación de Consonantes	48
3.8 Ruido de fondo	49
3.8.1 Curvas NC	49
3.8.2 Curvas RC	50
3.8.3 Curvas NCB	51
3.9 Criterios de diseño	52
3.9.1 Dimensionado	52
3.9.2 Escenario	53
3.9.3 Anfiteatros	53
3.9.4 Direccionamiento de las primeras reflexiones.....	54
CAPÍTULO IV	55
4. ESTADO DEL ARTE.....	57
4.1 Evolución histórica.....	57
4.2 Situación actual	57
4.3 Auditorio Kursaal de San Sebastián	58
4.4 Auditorio ciudad de León.....	59





CAPÍTULO V	61
5. DESCRIPCIÓN DEL TEATRO TOMÁS Y VALIENTE.....	63
5.1 Alcance.....	63
5.2 Entorno.....	64
5.3 Estructura	64
5.4 Características.....	65
CAPÍTULO VI	67
6. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	69
6.1 Medida del Tiempo de Reverberación.....	69
6.1.1 Condiciones de medida	69
6.1.2 Equipamiento y conexionado	71
6.1.3 Método de evaluación y configuración de la medida	72
6.1.4 Ejecución del proceso y presentación de resultados.....	73
6.1.5 Análisis de resultados y conclusiones	77
6.2 Medida del ruido de fondo	79
6.2.1 Condiciones de medida	79
6.2.2 Equipamiento y conexionado	79
6.2.3 Método de evaluación y configuración de la medida	80
6.2.4 Ejecución del proceso y presentación de resultados.....	80
6.2.5 Análisis de resultados y conclusiones	83
6.2.5.1 Curvas RC	84
6.2.5.2 Curvas NCB.....	85
CAPÍTULO VII	91
7. MODELO INFORMÁTICO DEL TEATRO EN EASE.....	93
7.1 Diseño del modelo acústico del recinto.....	93
7.2 Asignación de materiales.....	95
7.3 Asignación de texturas	105
7.4 Asignación de áreas de audiencia	109
CAPÍTULO VIII	111
8. SIMULACIÓN DE MAGNITUDES ACÚSTICAS.....	113
8.1 Tiempo de reverberación	113
8.2 Tiempo de caída inicial EDT	117
8.3 Nivel de presión sonora directo	120
8.4 Nivel de presión sonora total.....	122





8.5	Pérdida de articulación de las consonantes.....	124
8.6	Índice de inteligibilidad de la palabra.....	126
8.7	Claridad de la palabra	128
8.8	Claridad musical	130
8.9	Definición	132
8.10	Eficiencia lateral	134
8.11	Auralización	136
CAPÍTULO IX		137
9.	CONCLUSIONES.....	139
CAPÍTULO X		141
10.	PRESUPUESTO.....	143
BIBLIOGRAFÍA		147
PLANOS		149



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del nivel directo y reflejado asociado a un ecograma.....	5
Figura 2. Llegada de reflexiones a un punto.....	6
Figura 3. Directividad de la voz humana.....	9
Figura 4. Variación del nivel de presión sonora en función de la distancia a la fuente.....	9
Figura 5. Evolución de la señal en un recinto.....	13
Figura 6. Representación del tiempo de reverberación.....	13
Figura 7. Difracción producida ante diferentes obstáculos.....	16
Figura 8. Difusión del sonido en función de la frecuencia.....	17
Figura 9. Refracción de un rayo sonoro.....	17
Figura 10. Diagrama de construcción de fuente imaginaria y rayos reflejados.....	18
Figura 11. Diagrama de una sala cuadrada con sus fuentes imagen.....	19
Figura 12. Diagrama de rayos sobre superficies curvas.....	20
Figura 13. Planos pertenecientes al modo propio (3, 2, 1).....	23
Figura 14. Distribución de ondas axiales, tangenciales y oblicuas.....	24
Figura 15. Diagrama de Bolt, para una distribución uniforme de frecuencias propias.....	25
Figura 16. Anatomía del oído humano.....	27
Figura 17. Niveles audibles y zonas de reproducción en función de la frecuencia.....	27
Figura 18. Curvas isofónicas de sensibilidad del oído de <i>Fletcher-Munson</i>	28
Figura 19. Diferencias de nivel y de retardo simultáneas.....	29
Figura 20. Efecto enmascarante en el margen de frecuencias audibles.....	30
Figura 21. Impresión subjetiva de dos sonidos con diferentes retardos.....	31
Figura 22. Contribución frecuencial al nivel de la voz e inteligibilidad de la palabra.....	33
Figura 23. Valores de corrección de la curva de ponderación A.....	37
Figura 24. Valores recomendados de T_{mid} en función del volumen del recinto.....	38
Figura 25. Decaimiento de la energía sonora de un recinto relacionando EDT y T.....	40
Figura 26. Obtención de ITDG a partir de un ecograma.....	41
Figura 27. Correlación entre STI / RASTI y ALCons.....	47
Figura 28. Determinación de ALCons.....	48
Figura 29. Curvas NC.....	49
Figura 30. Curvas RC.....	50
Figura 31. Curvas NCB.....	51
Figura 32. Dimensionado de anfiteatros en recintos destinados a la palabra.....	53
Figura 33. Recomendación de diseño para techos y paredes laterales.....	54
Figura 34. Auditorio Kursaal, San Sebastián.....	58
Figura 35. Modelo acústico y parámetros del Auditorio Kursaal.....	59
Figura 36. Auditorio Ciudad de León.....	59





Figura 37. Modelo acústico y parámetros del Auditorio Ciudad de León.	60
Figura 38. Maqueta del diseño del Centro Cultural Tomás y Valiente.....	63
Figura 39. Mapa de ubicación del Centro Cultural Tomás y Valiente en Fuenlabrada.	64
Figura 40. Vista exterior del teatro Tomás y Valiente.	65
Figura 41. Interior del Teatro Tomás y Valiente.....	66
Figura 42. Posiciones de la fuente emisora y los puntos de medida.	71
Figura 43. Esquema de conexionado para la medida del tiempo de reverberación.	72
Figura 44. Tiempo de reverberación promedio para la fuente en la posición F_1	74
Figura 45. Tiempo de reverberación promedio para la fuente en la posición F_2	75
Figura 46. Tiempo de reverberación global.	76
Figura 47. Tiempo de reverberación promedio en cada punto desde 400 Hz a 1250 Hz.	77
Figura 48. Esquema de conexionado para la evaluación del tiempo de reverberación.....	80
Figura 49. Ruido de fondo en cada punto con el sistema de ventilación encendido.....	81
Figura 50. Ruido de fondo en cada punto con el sistema de ventilación apagado.....	82
Figura 51. Niveles RF para condiciones de ventilación encendida y apagada.	83
Figura 52. L_{pR_1} conforme a curvas RC para ventilación encendida.....	84
Figura 53. L_{pR_2} conforme a curvas RC para ventilación apagada.....	84
Figura 54. L_{pR_1} frente a curvas NCB para ventilación encendida.....	86
Figura 55. L_{pR_2} frente a curvas NCB para ventilación apagada.	86
Figura 56. Evaluación de ruido retumbante de L_{pR_1} para ventilación encendida.....	87
Figura 57. Evaluación de ruido retumbante de L_{pR_2} para ventilación apagada.....	87
Figura 58. Evaluación de ruido siseante de L_{pR_1} para ventilación encendida.	88
Figura 59. Evaluación de ruido siseante de L_{pR_2} para ventilación apagada.	88
Figura 60. Proyección en perspectiva del diseño del teatro en 3D obtenido en EASE.....	93
Figura 61. Proyección en alzado del modelo acústico del teatro en 3D.....	94
Figura 62. Proyección en planta del modelo acústico del teatro en 3D.	94
Figura 63. Proyección frontal del modelo acústico del teatro en 3D.	94
Figura 64. Absorción del parquet empleado en el modelo acústico.....	96
Figura 65. Absorción del material de las butacas empleado en el modelo acústico.	97
Figura 66. Absorción de la pared de ladrillo pintado empleado en el modelo acústico.....	97
Figura 67. Absorción de la moqueta de pared empleada en el modelo acústico.....	98
Figura 68. Absorción del panel DIN empleado en el modelo acústico.....	98
Figura 69. Absorción del hormigón empleado en el modelo acústico.	99
Figura 70. Absorción del telón empleado en el modelo acústico.....	99
Figura 71. Absorción de la tarima de madera empleada en el modelo acústico.	100
Figura 72. Absorción de la madera barnizada empleada en el modelo acústico.....	100
Figura 73. Absorción del pladur empleado en el modelo acústico.	101





Figura 74. Absorción del panel perforado empleado en el modelo acústico.	101
Figura 75. Absorción del material de las puertas empleado en el modelo acústico.	102
Figura 76. Absorción del panel Acustisón-50A empleado en el modelo acústico.	102
Figura 77. Absorción del vidrio empleado en el modelo acústico.	103
Figura 78. Vista exterior de la asignación de color a materiales.	103
Figura 79. Vista interior de asignación de materiales desde el escenario.	104
Figura 80. Vista interior de asignación de materiales desde la sala de control.	104
Figura 81. Imagen real y modelo texturizado desde primer palco.	105
Figura 82. Imagen real y modelo texturizado desde palco superior.	106
Figura 83. Imagen real y modelo texturizado desde cabina técnica.	107
Figura 84. Imagen real y modelo texturizado desde el escenario.	108
Figura 85. Distribución de las áreas de audiencia sobre el modelo acústico del teatro.	109
Figura 86. Áreas de audiencia sobre el modelo acústico para el mapeado en 2D.	109
Figura 87. Ecograma representativo de T calculado por Schroeder.	114
Figura 88. Comparativa de tiempo de reverberación medido <i>in situ</i> y por Schroeder.	116
Figura 89. Comparativa de tiempo de reverberación calculado por Schroeder.	116
Figura 90. EDT para 125 Hz.	117
Figura 91. EDT para 1000 Hz.	118
Figura 92. EDT para 5000 Hz.	118
Figura 93. EDT simulado y T medido <i>in situ</i>	119
Figura 94. EDT simulado para sala vacía y ocupada.	119
Figura 95. L_p directo para 125 Hz.	120
Figura 96. L_p directo para 1000 Hz.	120
Figura 97. L_p directo para 5000 Hz.	121
Figura 98. Espectro de L_p directo medio para una fuente de potencia 100 W.	121
Figura 99. L_p total para 125 Hz.	122
Figura 100. L_p total para 1000 Hz.	122
Figura 101. L_p total para 5000 Hz.	123
Figura 102. L_p directo y total para voz humana emitiendo.	123
Figura 103. Valores de ALCons en las áreas de audiencia con sala vacía.	124
Figura 104. Valores de ALcons en las áreas de audiencia con la sala ocupada.	125
Figura 105. Valores de RASTI en las áreas de audiencia con la sala vacía.	126
Figura 106. Valores de RASTI en las áreas de audiencia con la sala ocupada.	127
Figura 107. C_{50} para 125 Hz.	128
Figura 108. C_{50} para 1000 Hz.	128
Figura 109. C_{50} para 5000 Hz.	129
Figura 110. Espectro de la claridad C_{50}	129





Figura 111. C_{80} para 125 Hz.	130
Figura 112. C_{80} para 1000 Hz.	130
Figura 113. C_{80} para 5000 Hz.	131
Figura 114. Espectro de claridad C_{80}	131
Figura 115. Definición para 125 Hz.	132
Figura 116. Definición para 1000 Hz.	132
Figura 117. Definición para 5000 Hz.	133
Figura 118. Definición.	133
Figura 119. Eficiencia Lateral para 125 Hz.	134
Figura 120. Eficiencia Lateral para 1000 Hz.	134
Figura 121. Eficiencia Lateral para 5000 Hz.	135
Figura 122. Eficiencia Lateral en función de la frecuencia.	135
Figura 123. Posiciones de los puntos de escucha para auralización.	136



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Intervalos T_{mid} recomendados en función del tipo de música.....	39
Tabla 2. Categoría acústica de la sala en función del coeficiente IACC	46
Tabla 3. Tabla de valoración del Índice de Transmisión de la Palabra.....	47
Tabla 4. Tabla de valoración de la Pérdida de Articulación de Consonantes.	48
Tabla 5. Curvas NC recomendadas en función del tipo de sala.....	50
Tabla 6. Rangos recomendados de curvas RC para diversas salas.	51
Tabla 7. Rangos recomendados de curvas NCB en diversas salas	52
Tabla 8. Posiciones de los dos puntos de emisión de la fuente.....	70
Tabla 9. Posiciones de los puntos de medida en las zonas de audiencia.	70
Tabla 10. Promediado de repeticiones de medida en cada punto para la fuente en F_1	74
Tabla 11. Promediado de repeticiones de medida en cada punto para la fuente en F_2	75
Tabla 12. Tiempo de reverberación global.	76
Tabla 13. Tiempos T_{mid} calculados.	78
Tabla 14. Valores óptimos de T_{mid} calculados para música.....	78
Tabla 15. Ruido de fondo medido en cada punto con la ventilación encendida.....	81
Tabla 16. Ruido de fondo medido en cada punto con la ventilación apagada.....	82
Tabla 17. Conversión del nivel de ruido de fondo L_{pR} en bandas de octava.	83
Tabla 18. Descripción de materiales presentes en el modelo acústico.	95
Tabla 19. Coeficientes de absorción de los materiales del modelo acústico.	96
Tabla 20. Código de color de asignación de materiales del modelo acústico.....	104
Tabla 21. Valores de T obtenido en EASE mediante Sabine para sala vacía y ocupada....	113
Tabla 22. T calculado por Schroeder medido cuando la sala está vacía.	115
Tabla 23. T calculado por Schroeder medido cuando la sala está ocupada.	115
Tabla 24. ALCons sala vacía.	124
Tabla 25. ALCons sala ocupada.	125
Tabla 26. RASTI sala vacía.	126
Tabla 27. RASTI sala ocupada.	127
Tabla 28. Valoración de C_{80}	131
Tabla 29. Valoración final de los parámetros acústicos analizados en el proyecto.	139



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

El presente documento muestra el estudio acústico del Teatro Tomás y Valiente el cual se encuentra situado en la localidad madrileña de Fuenlabrada (España).

El uso del recinto está destinado principalmente a representaciones teatrales, empleándose también como sala polivalente, de forma que se analizará su comportamiento acústico e idoneidad ante la variedad de usos a los que se destina.

1.1 Objetivos

Este proyecto fin de carrera trata de estudiar exhaustivamente el campo sonoro producido en el interior del teatro arriba especificado. Para ello se realizan medidas experimentales *in situ* de los parámetros representativos de un recinto acústico y la predicción de los mismos mediante la simulación de la sala a través del software de simulación acústica EASE, de forma que las características acústicas obtenidas mediante ambos procesos sean comparables, además de proponer mejoras en el entorno para cumplimiento de parámetros acústicos óptimos que se puedan exigir a esta sala.

1.2 Estructura

Para la realización del proyecto se han establecido distintas fases de trabajo que dividen el documento en varios capítulos cuya descripción figura a continuación.

Capítulo I. Introducción

Define brevemente los objetivos propuestos para la elaboración del proyecto y describe su estructura en capítulos.

Capítulo II. Fundamentos teóricos

Aporta la definición de conceptos teóricos, exponiendo los principales conceptos en el ámbito de la acústica y repasando las diferentes teorías acústicas existentes para el diseño de espacios arquitectónicos de tamaño y uso similar, así como los principios básicos de la psicoacústica y características de la palabra.

Capítulo III. Parámetros para la valoración acústica de salas

Define los criterios utilizados en el diseño de recintos acústicos y parámetros óptimos que definen la calidad destinada a la valoración acústica de salas en función el uso al que se destine el recinto, presentando valores óptimos para la palabra y música.





Capítulo IV. Estado del arte

Expone la evolución histórica y los avances relacionados con estudios acústicos realizados, además de mostrar una colección de recintos emblemáticos con características y parámetros acústicos similares al Teatro Tomás y Valiente, incluyendo aportaciones de opinión subjetivas pertenecientes a oyentes presentes en representaciones de los recintos.

Capítulo V. Descripción del teatro Tomás y Valiente

Este capítulo muestra la descripción del entorno del recinto sometido a estudio y usos principales a los que se destina. Además, aporta una descripción de las características arquitectónicas, escénicas y del aforo.

Capítulo VI. Descripción experimental

Corresponde a un apartado que contiene las medidas *in situ* de los parámetros acústicos más representativos del recinto para el análisis de sus características acústicas y posterior comparación con la predicción de los mismos mediante la simulación del modelo informático.

Capítulo VII. Modelo informático del teatro en EASE

Describe el proceso de diseño del modelo acústico informático, mediante el software de simulación electroacústica EASE, a partir de los planos de la instalación y medidas realizadas en el recinto. Además, se centra en la descripción de los materiales asignados a las distintas superficies que lo conforman, y la representación del modelo texturizado comparado al recinto real, definiendo las áreas de audiencia elegidas para la simulación.

Capítulo VIII. Simulación de magnitudes acústicas

Muestra los resultados de los parámetros obtenidos mediante la simulación por ordenador, analizando características acústicas mediante el software específico de simulación acústica EASE.

Capítulo IX. Conclusiones

Con el objetivo de aportar mejoras de las condiciones acústicas de la sala, se aporta una propuesta de mejoras en el entorno para cumplimiento de los parámetros acústicos óptimos exigibles. Si se detectaran parámetros de valores alejados de los óptimos se propondrá una solución mediante simulación mostrando el resultado coincidente para el uso deseado.

Capítulo X. Presupuesto

Este capítulo contiene el presupuesto económico correspondiente a la valoración del trabajo realizado a lo largo del proyecto para la elaboración del estudio acústico aplicado al Teatro Tomás y Valiente.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El objetivo de este apartado es conseguir el conocimiento teórico necesario para llevar a cabo el estudio acústico del recinto sometido a estudio, explicando la propagación de la onda acústica en espacios cerrados y describiendo las teorías acústicas empleadas para el estudio del campo sonoro en recintos, pasando por la descripción del sistema de transmisión de la señal hablada por ser el uso principal al que se destina la sala.

2.1 Propagación del sonido en recintos cerrados

A diferencia de los sonidos que se emiten en campo libre, el sonido emitido en el interior de un recinto cerrado llega a un punto de audiencia de dos formas diferentes, por una parte el oyente recibe parte de la energía de forma directa, y por otra recibe la energía que llega de forma indirecta procedente de las reflexiones que sufre la onda al incidir sobre las distintas superficies del recinto.

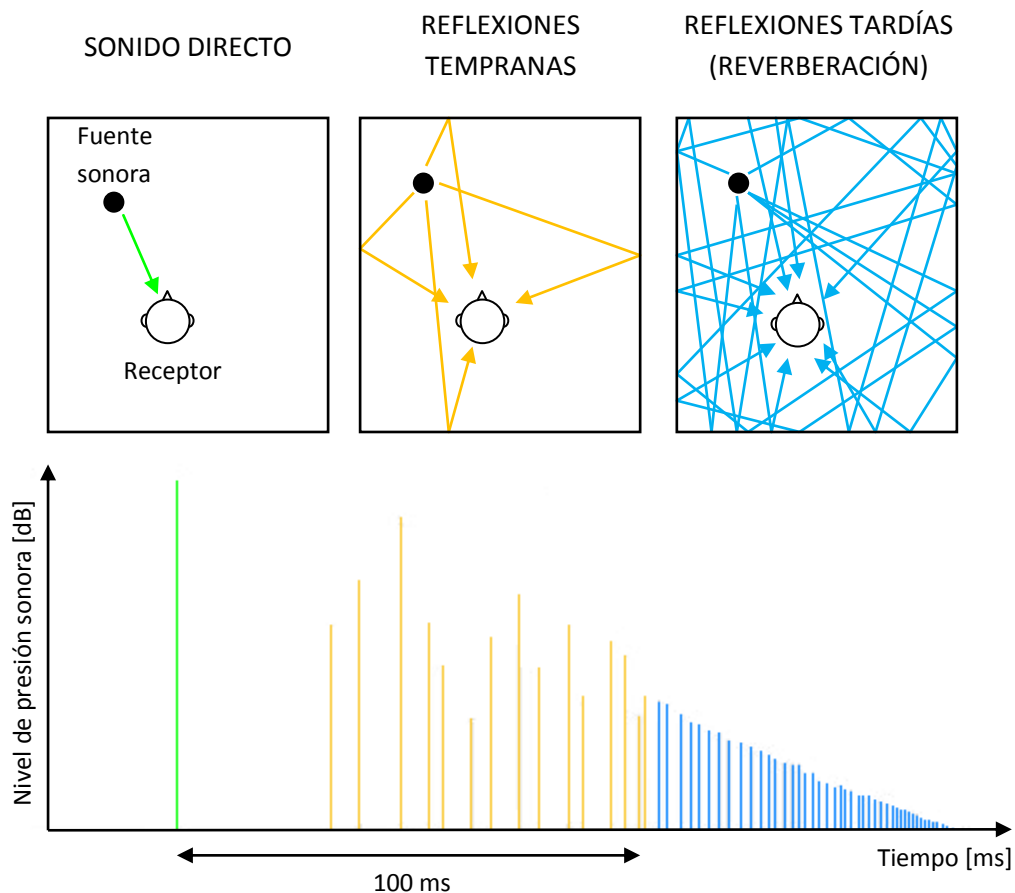


Figura 1. Representación del nivel directo y reflejado asociado a un ecograma.

En la figura 1 se puede observar la relación temporal de llegada del sonido (ecograma) en el que se pueden distinguir fácilmente el sonido directo y el sonido reflejado al excitar un recinto cerrado con un impulso sonoro [1].





El nivel de intensidad de las reflexiones disminuye a medida que aumenta el orden de reflexión, esto se debe a la pérdida de energía que experimentan al chocar contra las superficies límite del recinto y asociado a su absorción.

Además se debe a la ley de la divergencia esférica que es el efecto por el que el nivel de presión sonora disminuye conforme el sonido se propaga, siendo la cantidad de decibelios atenuados dependiente de la forma esférica de la onda, cayendo el nivel de presión sonora 6 dB cada vez que se duplica la distancia.

Como se puede observar en el ecograma correspondiente a la figura 1 se distinguen tres zonas diferenciadas, siendo la primera la correspondiente al sonido directo, representado en color verde.

A continuación, las reflexiones que llegan inmediatamente después de la onda directa emitida, distinguidas en color naranja, son todas aquellas reflexiones que lleguen antes de 100 ms después de la emisión de la onda directa.

Estas reflexiones tempranas llegan de una forma más distante entre sí que las reflexiones más tardías (representadas en color azul), ya que los rayos sonoros asociados han incidido menos veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al oyente, por lo que su orden es bajo.

Además, al depender directamente de la geometría del recinto, son específicas de cada punto y determinan junto con el sonido directo las características de percepción sonora.

Las reflexiones tardías correspondientes a la última zona del ecograma reciben el nombre de cola reverberante, que desde un punto de vista acústico aporta información del tamaño percibido de la sala.

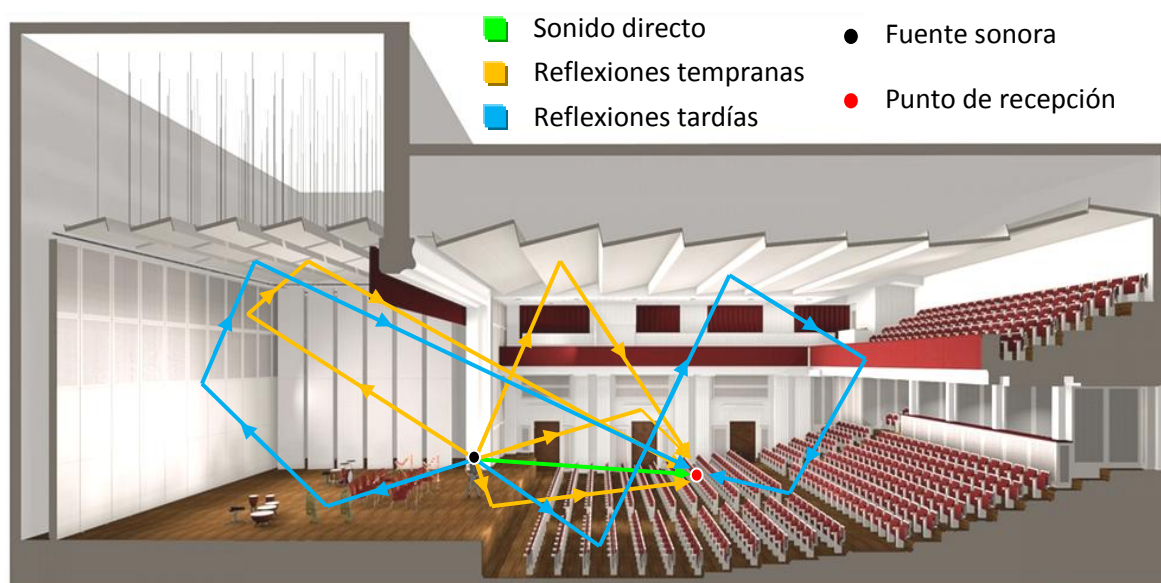


Figura 2. Llegada de reflexiones a un punto.



En la figura 2 se puede observar un diagrama simplificado de la llegada reflexiones a un punto de audiencia determinado tras incidir sobre las diferentes superficies de un recinto, por lo que se puede hacer una idea de la importancia de las mismas.

Expuestos los conceptos anteriores, se puede decir que la energía sonora total presente en una sala se obtiene como resultado de la suma de energía variable correspondiente al sonido directo, que disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente, y de la energía de valor constante asociado al sonido indirecto o reflejado. La energía de valor constante no depende del punto en consideración ya que se aplica la teoría estadística a todo el sonido reflejado tratando por igual a todas las reflexiones ya sean primeras o tardías, simplificando el cálculo de la energía total.

En términos habituales no se habla de energía, sino de un parámetro relacionado y fácilmente medible que es el nivel de presión sonora L_p (*Sound Pressure Level*), definido en un punto como la suma de la contribución de la presión de la onda directa y de las ondas reflejadas expresado en decibelios.

Así el nivel de presión sonora que genera una fuente puntual en un recinto con campo difuso es:

$$L_p[\text{dB}] = L_w + 10 \cdot \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (1)$$

Donde:

L_w : nivel de potencia acústica de la fuente emisora [dB].

R : constante de la sala [m^2].

Q : factor de directividad de la fuente.

r : distancia entre la fuente y el receptor [m].

Otra característica a tener en cuenta en el campo sonoro generado en un recinto cerrado son los modos propios (frecuencias características). El énfasis de alguno de ellos puede producir un cambio en el timbre de la señal básica de la fuente sonora, originando un efecto adverso en la recepción de la señal acústica.

Este efecto se lleva a cabo cuando se combina la acción de ondas incidentes y reflejadas y, como consecuencia de ello, se producen interferencias constructivas y destructivas, o lo que es lo mismo, ondas estacionarias y modos propios [2].

2.1.1 Análisis de parámetros

La ecuación 1 particulariza para el campo directo, ya que el primer sumando ($Q/4\pi r^2$) corresponde a la energía aportada por la onda directa L_{p_d} , y para el campo reverberante L_{p_r} , ya que el segundo sumando ($4/R$) corresponde a la energía aportada por las reflexiones.





2.1.1.1 Potencia acústica

Es una característica intrínseca de la fuente sonora que proporciona la información, en función de la frecuencia, de la intensidad acústica que es capaz de entregar promediada en una superficie. Se mide en *wattios* o puede expresarse también en dB a partir de una referencia w de valor indicado en la fórmula.

$$L_W[\text{dB}] = 10 \cdot \log\left(\frac{w}{10^{-12}}\right) \quad (2)$$

2.1.1.2 Constante de la sala

El índice R pertenece a la constante de la sala, y es un indicativo de la absorción de ésta. Es un término totalmente dependiente de la frecuencia, tomando cada sala un determinado valor a cada banda frecuencial.

$$R [\text{m}^2] = \frac{S \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (3)$$

Donde S es la superficie total del recinto en m^2 y $\bar{\alpha}$ el coeficiente de absorción medio de la sala.

2.1.1.3 Directividad de la fuente

La directividad de la fuente se representa con el factor Q y caracteriza la radiación espacial de la fuente sonora.

$$Q = 10^{ID/10} \quad (4)$$

Además también se puede expresar en decibelios con el índice de directividad DI , que son los decibelios que se reciben en la dirección preferente de la fuente direccional respecto a los que daría una fuente omnidireccional de la misma potencia.

$$ID = L_{P_i} - \overline{L_P} \quad (5)$$

Donde L_{P_i} es el nivel de presión sonora a cada distancia de la fuente en una dirección y $\overline{L_P}$ el nivel de presión sonora medio a la misma distancia [3].

Capa tipo de fuente sonora tiene su propio diagrama de directividad y cada diagrama es diferente para cada banda frecuencial. De esta forma, no es lo mismo tratar un escenario si va a reproducirse una voz cantada o una orquesta. Para su comprensión se muestra en la siguiente figura algunos ejemplos de radiación.

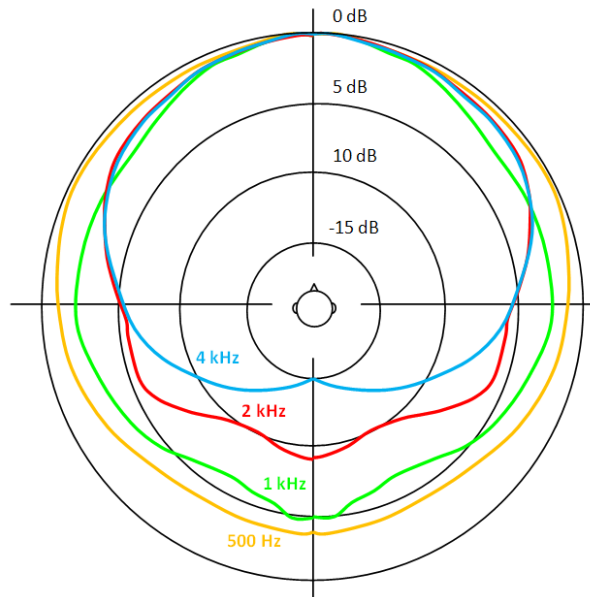


Figura 3. Directividad de la voz humana [4].

Posteriormente, en el apartado 2.3.4 se analizará de una forma más exhaustiva la directividad de la voz humana por ser el uso principal al que se destina el recinto sometido a estudio.

2.1.1.4 Distancia entre la fuente y el receptor

Según la ecuación 1, la distancia existente entre la fuente sonora y el oyente influye a la hora de calcular el nivel de presión sonora de la onda directa, ya que en función de la situación del oyente variará la distribución del nivel de presión sonora en el recinto.

Para su comprensión en la siguiente figura se muestra la representación gráfica de la distribución teórica del nivel de presión sonora en el interior de un recinto en función de la distancia a la fuente emisora.

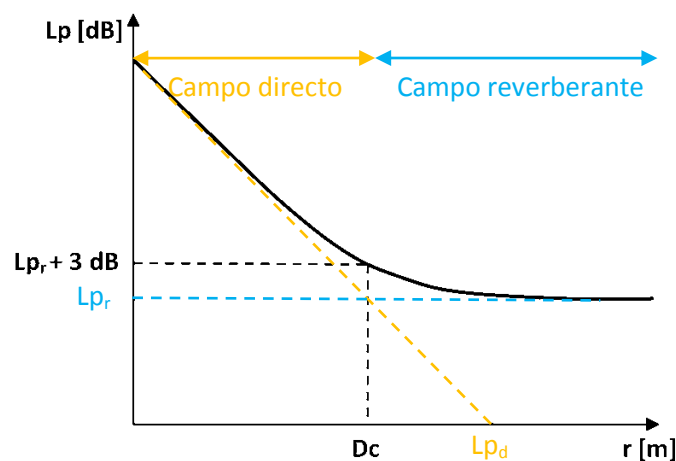


Figura 4. Variación del nivel de presión sonora en función de la distancia a la fuente.





En la figura 4 se indica la distribución debida a cada uno de los campos por separado, siendo la curva representada en azul el resultado global de la combinación de ambos.

Analizando por separado las zonas del campo sonoro cabe destacar la zona de campo próximo no reflejada en la figura 3 y caracterizada porque el medio está condicionado por la fuente ya que la distancia del oyente a la misma es muy pequeña.

A continuación se encuentra la zona de campo directo en la que la variación del campo sonoro viene dada por el medio en lugar de por la fuente, caracterizado por la ley de la divergencia esférica que es el efecto por el que el nivel de presión sonora del campo directo disminuye conforme el sonido se propaga, cayendo 6 dB cada vez que se duplica la distancia.

La siguiente zona del campo sonoro se distingue a partir de la distancia crítica que es el lugar en el cual la energía aportada por la onda directa es igual a la energía aportada por la reflexiones.

$$D_c \text{ [m]} = 0,14\sqrt{Q \cdot R} \quad (6)$$

A partir de la distancia crítica se localiza la zona de campo reverberante, en la cual la energía aportada por la fuente es despreciable. La energía reverberante sólo se define para el estado estacionario ya que es cuando la energía sonora se emite de forma continua [3].

2.2 Teorías acústicas

A la hora de proceder a la aproximación de forma teórica de un problema planteado, relacionado con la acústica de salas, existen distintos métodos para su resolución.

El origen del motivo de la variedad de métodos a utilizar reside en la evolución histórica del desarrollo de las diferentes teorías, ya que cuando se desarrollaron en su inicio los medios técnicos para su estudio eran más escasos que los que existen en la actualidad, siendo su consecuencia la simplificación del estudio para resolver el problema.

Durante el desarrollo de los fundamentos teóricos del proyecto se analizan las diferentes teorías acústicas avanzando en función del grado de precisión y complejidad de la caracterización del campo sonoro de un recinto.

En primer lugar se analizarán las teorías estadística, geométrica y ondulatoria, principalmente caracterizadas porque tienen en cuenta parámetros objetivos como energía, potencia y absorción, seguidas de la teoría psicoacústica que estudia factores subjetivos y diferentes en función del tipo de oyente.



2.2.1 Teoría estadística

Es la principal teoría que suele usarse para el estudio del campo sonoro de una forma rápida y sencilla, ya que estudia el comportamiento de la energía acústica en la sala y permite obtener conclusiones objetivas de los aspectos cualitativos, permitiendo detectar defectos en el acondicionamiento de la sala partiendo de la suposición de un campo uniforme en el recinto desde su visión estacionaria.

En lo que respecta a su campo de validez para un empleo de la teoría con un mínimo grado de error es necesario el cumplimiento la misma a partir de las siguientes consideraciones:

- I. Las ondas deben formar un campo acústico lo más uniforme posible, es decir, la llegada de las ondas a cada punto del recinto desde las diferentes direcciones será equiprobable, o lo que es lo mismo, conseguir un campo sonoro difuso, ya que si esta condición no se cumple las conclusiones serán imprecisas.
- II. Las dimensiones de la sala deben ser superiores a la mayor longitud de onda de uso.
- III. Los coeficientes de absorción de las superficies del recinto deben ser moderados y similares.
- IV. Los resultados se deben obtener a partir de valores promediados, no instantáneos, sin tener en cuenta la fase, por lo que la probabilidad de todos los posibles desfases para las ondas sumadas ha de ser la misma.

2.2.1.1 Coeficiente de absorción sonora

El coeficiente de absorción es una magnitud que expresa la cantidad de energía absorbida por un material, se define como la relación entre la energía absorbida por una superficie respecto la energía incidente, en función de la frecuencia.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (7)$$

Para analizar las propiedades de absorción de los materiales es necesario tener en cuenta el ángulo de incidencia de las reflexiones que inciden sobre ellos, ya que su absorción puede depender del mismo, por tanto, la capacidad de absorción será el promedio de los valores encontrados para ondas que inciden desde todos los ángulos.

En caso de que las n superficies del recinto tengan la misma superficie, el coeficiente de absorción medio se puede expresar de la siguiente forma.

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (8)$$





Donde α_i se corresponde con los coeficientes de absorción sonora de cada unidad de material.

Sin embargo, la absorción media se calcula en función de la superficie que ocupe cada material, por tanto, el coeficiente de absorción medio se define como la suma de las absorciones proporcionada por cada material dividida entre la superficie total de la sala.

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (9)$$

Donde S_i se corresponde son las diferentes superficies de cada unidad de material que compone el recinto.

Una vez analizado el coeficiente de absorción sonora es necesario definir el área de absorción sonora equivalente como unidad de absorción en m^2 que representa una superficie capaz de absorber sonido igual que una superficie de 1 m^2 perfectamente absorbente, como puede ser una ventana abierta.

$$A [m^2] = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i = \bar{\alpha} \cdot S \quad (10)$$

Es importante conocer que no sólo se tendrá en cuenta la absorción de las superficies del recinto, sino también la de los materiales que hay dentro del mismo, tratándolos como si de una superficie más del recinto se tratase a la hora de aplicar el cálculo de la absorción sonora total [3].

2.2.1.2 Tiempo de reverberación

Cuando se excita una sala con una fuente sonora emitiendo un sonido continuo en función del tiempo, la densidad de energía sonora en un punto determinado de la sala incrementa (crecimiento) hasta llegar a un estado de equilibrio en el cual la energía absorbida por la sala es igual a la emitida por la fuente, el denominado nivel de estado estacionario o régimen permanente.

Si en este estado la fuente interrumpe súbitamente su emisión, la densidad de energía sonora disminuye gradualmente en lugar de desaparecer (decaimiento), de acuerdo con las características absorbentes de la sala y su volumen.

Es uno de los principales parámetros indicadores de la calidad acústica de una sala, su valor depende de numerosos factores como son el coeficiente de absorción de los materiales de la sala, el volumen, la superficie, y el dimensionamiento de esta entre otros.

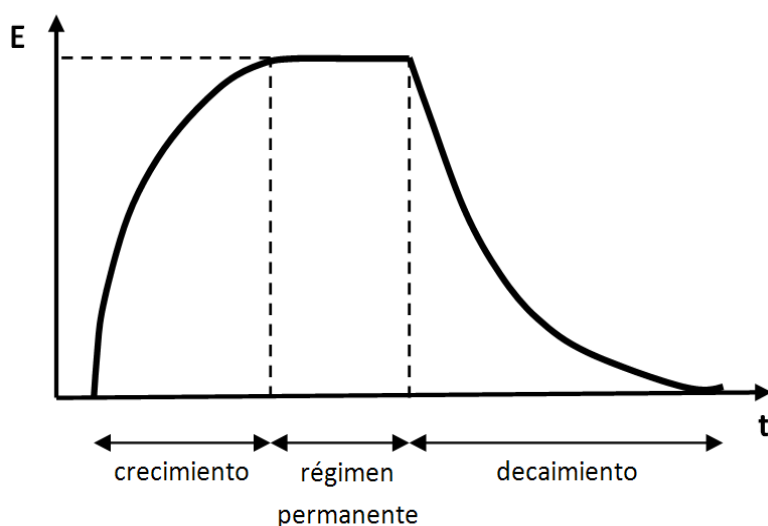


Figura 5. Evolución de la señal en un recinto.

Se denomina tiempo de reverberación al tiempo transcurrido que tarda en decrecer 60 dB la energía que recibe el receptor tras parar bruscamente la fuente de excitación, o lo que es lo mismo, el tiempo empleado por la energía sonora para disminuir 10^{-6} veces su valor original.

Las principales formulaciones para el cálculo teórico del tiempo de reverberación se encuentran dentro del marco de la teoría estadística y se representa a continuación.

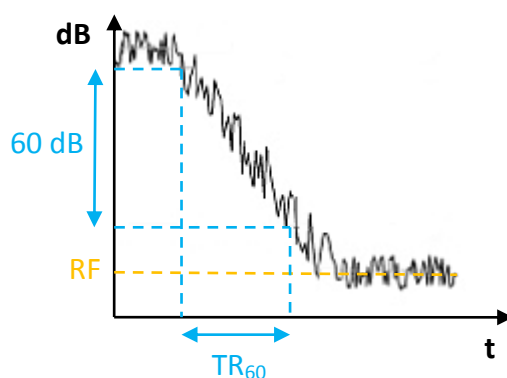


Figura 6. Representación del tiempo de reverberación.

Se ha definido el tiempo de reverberación como el que tarda en decrecer 60 dB la energía que recibe el receptor tras parar bruscamente la fuente de excitación, el denominado T_{60} , aunque existen otras interpretaciones en función del nivel de ruido de fondo del recinto que se definen a continuación.

I. T_{30} y T_{20}

T_{30} es el tiempo de reverberación de caída de 60 dB pero siguiendo la pendiente de caída de los primeros 30 dB, ya que en muchas ocasiones la señal de excitación no puede estar 60 dB por encima del ruido de fondo de la sala, de este modo, se busca una dinámica de 30 dB y se calcula el T_{60} siguiendo la pendiente marcada por estos 30 dB.





En ocasiones se malinterpreta T_{30} definiéndolo como el tiempo de caída de 30 dB, lo que implicaría que T_{60} fuese el doble, pero esta interpretación es errónea.

T_{20} es el tiempo de caída de 60 dB pero siguiendo la pendiente marcada por los 20 dB de caída. Se utiliza cuando el ruido de fondo de la sala es elevado y la excitación sólo supera al ruido en 20 dB.

Tanto T_{30} como T_{20} también pueden ser utilizados para saber, comparando los diferentes valores, si la sala posee un campo acústico uniforme o no ya que valores iguales de los diferentes parámetros implican uniformidad de campo y valores diferenciados implican diferentes pendientes de caída en la respuesta de la sala.

II. Sabine

La fórmula de Sabine está basada en el libre recorrido medio ($I_m = 4V/S$) asumiendo las hipótesis de la teoría estadística como son las características de campo acústico uniforme, campo difuso, sala viva, igual probabilidad de propagación en todas direcciones y distribución homogénea de la absorción.

$$T [s] = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}} \quad (11)$$

La fórmula de Sabine para el cálculo el tiempo de reverberación es una de las más utilizadas con aceptación a nivel internacional pese a su sencillez de cálculo. No obstante, únicamente proporciona buenos resultados para recintos que posean un coeficiente de absorción medio menor o igual a 0,2.

III. Eyring

Según la estimación de Sabine, si la absorción es igual a la unidad (reverberación nula), el tiempo de reverberación resultante es distinto de cero. Además, si se calcula el coeficiente de absorción medio en función del tiempo de reverberación, el resultado obtenido puede ser mayor que la unidad, lo que no tiene sentido físicamente.

La teoría de Eyring corrige estas deficiencias manteniendo la suposición de campo difuso, además de basarse también en el libre recorrido medio.

$$T [s] = \frac{0,161 \cdot V}{S(-\ln(1 - \bar{\alpha}))} \quad (12)$$

Para valores de absorción menores a 0,2 las fórmulas de Sabine y Eyring coinciden. Sin embargo, para salas más absorbentes sería más correcta la ecuación de Eyring que se adecua a todo tipo de absorciones, aunque existe la desventaja de que solo se cumple si la distribución del material absorbente del recinto es uniforme.



IV. Millington-Sette

Es otra de las opciones que se contemplan para recurrir al cálculo del tiempo de reverberación en caso de la existencia de variedad de materiales en un recinto grande, y por tanto, también la diferencia entre los diversos valores de los coeficientes de absorción.

$$T [s] = \frac{0,161 \cdot V}{-\sum S_i \ln(1 - \bar{\alpha}_i)} \quad (13)$$

Sin embargo, en la fórmula de Millington-Sette existe una contrariedad, ya que prosigue con la idea de campo sonoro difuso contradiciendo la hipótesis de partida de reparto uniforme de material absorbente. De esta forma, se mantiene la posibilidad de una no uniformidad de disposición del material absorbente dentro de la casi uniformidad que implica el campo sonoro difuso.

Tras el análisis de las diferentes formas de cálculo del tiempo de reverberación es necesario analizar la contribución de la absorción producida por el aire en el proceso de decaimiento del sonido en alta frecuencia (2 kHz – 4 kHz) y para salas grandes.

En el cálculo del tiempo de reverberación debe ser introducido el segundo término que se indica a continuación para el caso de Millington-Sette, ya que pese a la contrariedad que experimenta para la condición de campo difuso, es una de las aproximaciones para el cálculo del tiempo de reverberación más utilizadas [5].

$$T [s] = \frac{0,161 \cdot V}{-\sum S_i \ln(1 - \bar{\alpha}_i) + 4mV} \quad (14)$$

Donde m es el coeficiente de atenuación de energía sonora en el aire en m^{-3} .

2.2.2 Teoría geométrica

Es una teoría permite estudiar el campo sonoro en un recinto desde un punto de vista diferente al que experimentan otras teorías, en la práctica se utilizan una serie de parámetros complementarios que, por depender de la situación del receptor, están fundamentados en la acústica geométrica.

Por ejemplo, la teoría estadística definida anteriormente se basa en la suposición de la distribución uniforme de energía en un recinto, sin embargo este caso se produce con escasez en la realidad.

La teoría geométrica asocia la onda sonora a un rayo que se propaga por la sala, aplicando las leyes de la óptica geométrica para deducir la dirección de propagación de los rayos tras cada incidencia sobre las diferentes superficies del recinto, ayudándose de los coeficientes de absorción de cada material para calcular la energía en cada reflexión.





La gran ventaja que aporta es que permite localizar los aspectos negativos de las reflexiones sonoras, así como proporcionar sonido útil en determinadas posiciones en el tiempo adecuado y con una alta fiabilidad si la longitud de onda es pequeña frente a las dimensiones de la sala, es decir, la exactitud será mayor para sonidos de media y alta frecuencia. Sin embargo, esta teoría presenta la desventaja de no tener un conocimiento global del comportamiento del recinto.

Esta teoría aplicada en los programas informáticos de simulación de salas mediante trazado de rayos en los que se determinan los puntos de incidencia de los rayos sobre las superficies límites del recinto, así como las pérdidas asociadas a la absorción sonora de los materiales que las recubren.

2.2.2.1 Leyes geométricas de la propagación

Según la teoría geométrica y basado en el principio óptico de Fermat, la propagación de las ondas en el interior del recinto desde el emisor hasta el receptor es por el camino más corto. Si el medio es homogéneo la velocidad de propagación será uniforme y como consecuencia el camino más rápido coincidirá con el más corto.

La propagación de los diferentes rayos emitidos por la fuente es en línea recta, generándose de esta forma la división de rayos propagados en distintas direcciones en función de la potencia total emitida por la fuente, sufriendo distintos efectos según los obstáculos con los que se encuentren en su recorrido. Para ello a continuación se describen los diversos fenómenos que se producen en las ondas sonoras.

I. Difracción

Es el fenómeno por el que una onda sonora se propaga en la misma dirección y sentido tras un pequeño obstáculo, continuando parte de la energía bordeándolo (sombra).

Sin embargo, tras obstáculos de gran tamaño el rayo será incapaz de bordearlo y como consecuencia este fenómeno será inexistente. Los límites de la sombra estarán determinados por los rayos tangenciales que alcanzan la periferia del obstáculo.

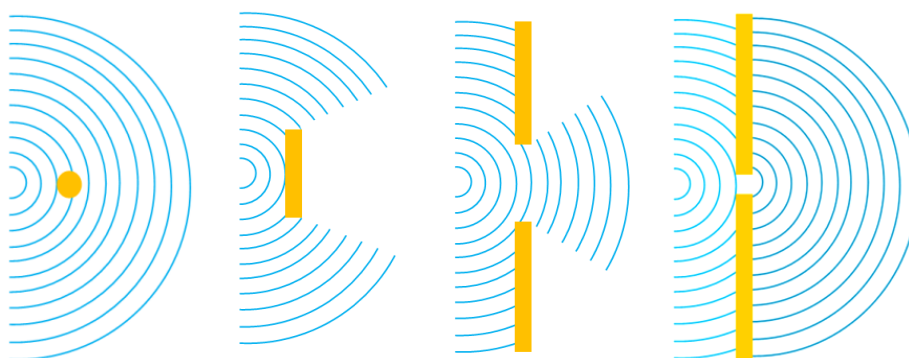


Figura 7. Difracción producida ante diferentes obstáculos.



II. Reflexión

Fenómeno producido cuando parte de la energía de la onda sonora incidente sobre un obstáculo es devuelta a la sala viajando en la misma dirección y sentido contrario a la onda incidente.

Si el rayo incidente, el reflejado y la normal coinciden en el mismo plano y éste es perpendicular a la dirección de choque, a este tipo de reflexión se le denomina reflexión especular.

Si la superficie sobre la que incide la onda sonora se considera rugosa respecto de la longitud de onda de la onda incidente, se produce el fenómeno de reflexión difusa, mediante el cual el rayo se reflejará en diferentes direcciones en función del ángulo de incidencia sobre la superficie.

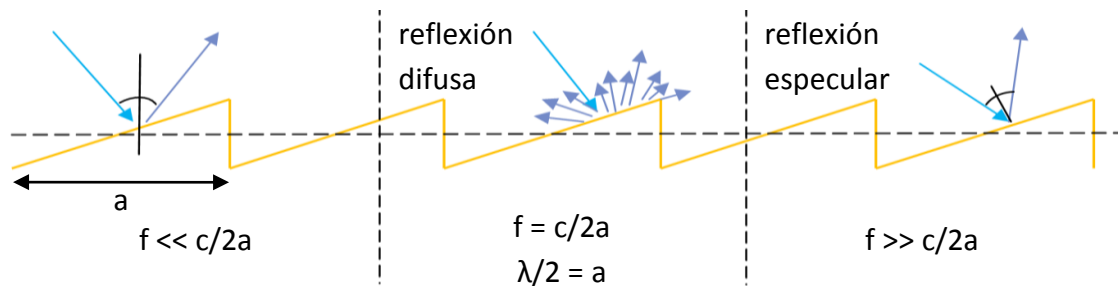


Figura 8. Difusión del sonido en función de la frecuencia [6].

III. Refracción

Si la dirección de propagación de la onda sonora cambia al pasar por una región ocupada por dos medios de diferente naturaleza suponiendo un cambio en la velocidad de propagación de la onda significa que se está produciendo el fenómeno de la refracción.

Este fenómeno se presenta cuando los medios no son perfectamente homogéneos, sino que sus propiedades cambian de un punto a otro y como consecuencia la velocidad de propagación de las ondas en ellos.

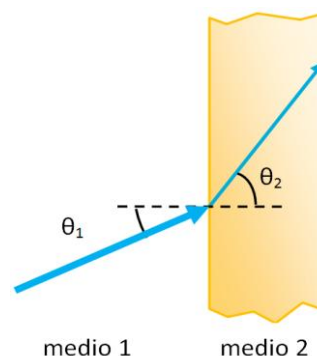


Figura 9. Refracción de un rayo sonoro.





Se suele dar por cambios de temperatura producidos por columnas de aire caliente mediante las que el sonido viaja más rápidamente, percibiendo el oyente que se sitúa detrás de ellas el sonido como si procediese de una fuente más alejada que la real y con una menor intensidad. Por este motivo los sistemas de acondicionamiento de temperatura no deben colocarse entre la fuente y el oyente.

2.2.2.2 Fuentes imagen

El método de estudio de la acústica de recintos mediante la teoría geométrica consiste en la construcción, basándose en las leyes de la óptica, de diagramas que indican las trayectorias de los rayos sonoros reflejados.

Cada rayo reflejado puede considerarse procedente de un foco imaginario S' , simétrico del foco real S respecto del plano de incidencia, decayendo la intensidad de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida.

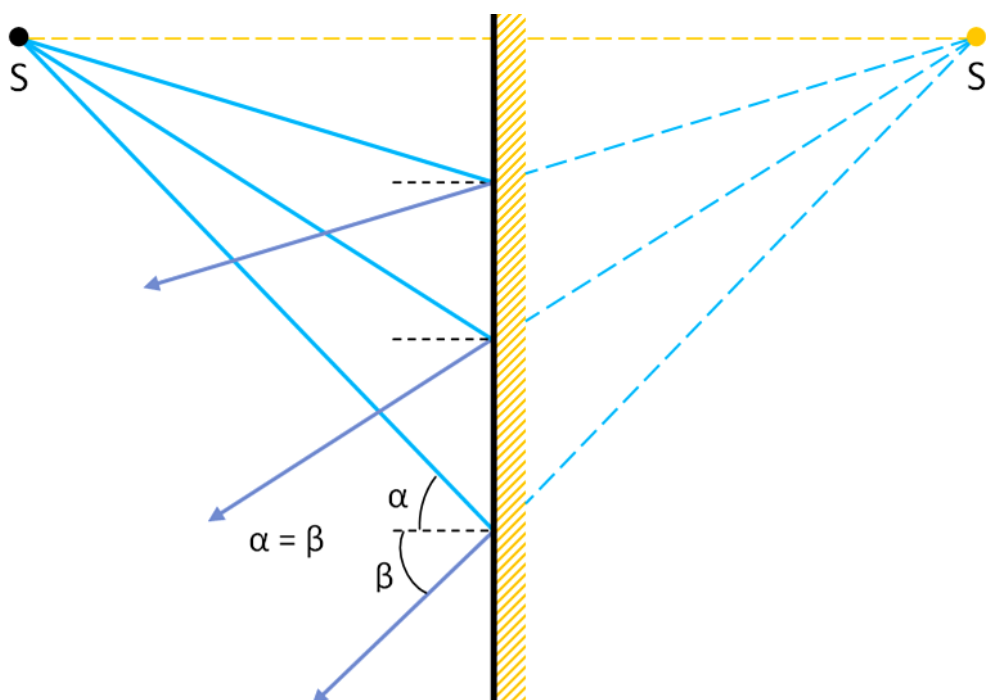


Figura 10. Diagrama de construcción de fuente imaginaria y rayos reflejados.

Los focos imaginarios son denominados fuentes imagen y gracias a su representación se conoce el número de frentes de onda que alcanzarán la posición de un oyente situado en un punto P del recinto, siendo S la fuente real (véase figura 10).

Para la construcción de un diagrama, las fuentes imagen se sitúan en recintos imaginarios adyacentes al recinto real y de la misma dimensión, el cual se sitúa en el centro de la representación del diagrama.

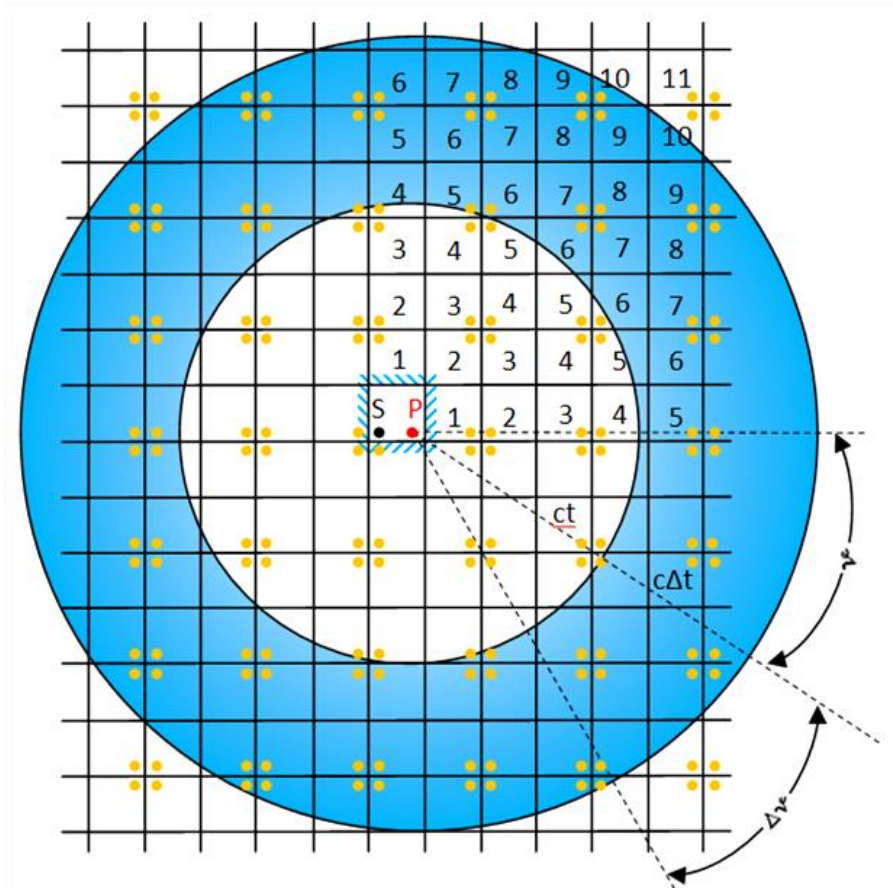


Figura 11. Diagrama de una sala cuadrada con sus fuentes imagen [6].

Según la figura 11 se construyen dos anillos centrados en el receptor P de radio ct y $c(t + \Delta t)$, alcanzando todos los frentes de onda Δn procedentes de todas las imágenes de la fuente S el punto receptor P en el incremento de tiempo Δt . El número de frentes de onda que lleguen al receptor en ese incremento de tiempo se define como el cociente del área del anillo y el área de la sala.

$$\Delta n = 2\pi c^2 \frac{t \cdot \Delta t}{l_1 \cdot l_2} \quad (15)$$

Donde l_1 y l_2 son las dimensiones de la sección de perfil del recinto. Además, para determinar el número de reflexiones que alcanzan al receptor desde una determinada dirección en ese margen de tiempo, siempre que el tiempo t sea suficientemente alto, el número de reflexiones no dependerá del ángulo θ , sino del $\Delta\theta$ que define el conjunto de direcciones de las que se pretende averiguar el número de frentes de onda [2].

Por tanto, el número de reflexiones que llegan durante el intervalo Δt procedente de direcciones comprendidas entre θ y $(\theta + \Delta\theta)$ se define de la siguiente forma.

$$\Delta(\Delta n) = \Delta n \frac{\Delta\theta}{2\pi} = \frac{(c \cdot \Delta t)(ct \cdot \Delta\theta)}{l_1 \cdot l_2} \quad (16)$$





2.2.2.3 Reflexiones sobre superficies curvas

La incidencia de un rayo sonoro sobre una superficie curva puede provocar concentraciones del sonido con el consiguiente malestar que puede producir en la escucha, por lo que se hace necesario estudiar la distribución de los materiales y la geometría del recinto.

Gracias a la teoría geométrica es posible realizar diagramas a escala que permiten calcular la dirección de propagación de los rayos incidentes y reflejados. Para la construcción de la reflexión de un rayo sobre superficies curvas se aplican la misma metodología que para superficies planas, la diferencia es que el rayo se refleja en un plano tangente a la superficie curva en el punto de incidencia.

Esto permitirá realizar el diseño de las superficies límites del recinto para conseguir una óptima distribución de los rayos sonoros en el interior de un recinto.

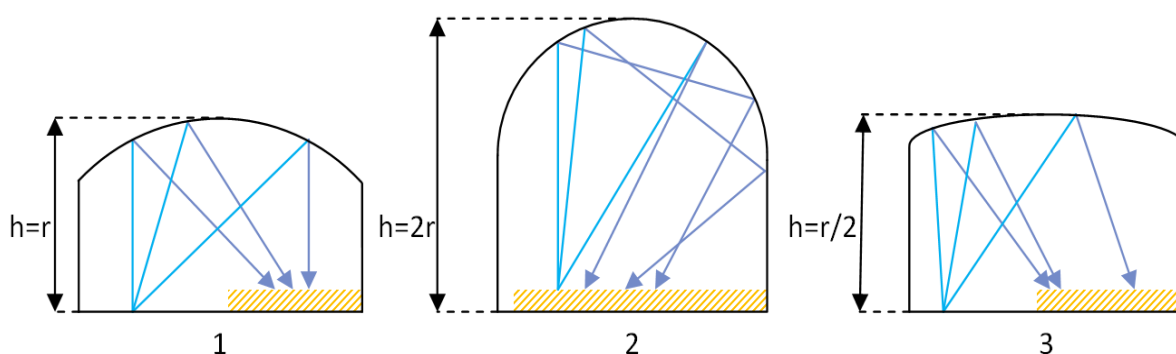


Figura 12. Diagrama de rayos sobre superficies curvas [6].

Según la figura 12 se pueden observar distintos casos de reflexión de rayos sobre la superficie curva del techo de un recinto en función de la altura y su radio de curvatura.

En el caso 1 se produce una concentración de rayos en la región de audiencia debido a que el radio de curvatura del techo es aproximadamente igual a su altura, como consecuencia se superponen en esa zona las ondas directas y las reflejadas afectando negativamente a las condiciones de audición.

Sin embargo, en los casos 2 y 3 se puede observar una distribución más uniforme de las ondas reflejadas sobre las zonas de audiencia, evitando concentraciones indeseadas.

Además, a parte de los problemas producidos por la concentración de sonido debido a la incidencia sobre superficies curvas, se producen ecos debido a la acumulación de ondas reflejadas de orden superior a dos en un punto de recepción del recinto con un tiempo de retardo superior al mínimo establecido, en este caso, para la palabra que es de 50 ms, y con una intensidad equiparable a la de las ondas directas.



2.2.3 Teoría ondulatoria

Es la única teoría que contempla el fenómeno ondulatorio del sonido, gracias a ella se puede estudiar la influencia del dimensionado y las proporciones del recinto en su calidad acústica.

Tanto las teorías estadística como geométrica realizan el estudio del campo sonoro de un recinto mediante idealizaciones, sin embargo la teoría ondulatoria permite la posibilidad de estudiar la naturaleza ondulatoria del sonido mediante la resolución de la ecuación de onda, presentando una gran complejidad en su estudio matemático.

Su principio básico reside en considerar el volumen de aire comprendido en el interior de un recinto cerrado como un sistema vibratorio complejo, formado por la combinación de múltiples sistemas con un grado de complejidad menor.

Al emitir, la fuente sonora origina un proceso vibratorio generando vibraciones forzadas y modos de vibración, llegando a una situación estacionaria o de equilibrio cuando estas se amortiguan. En equilibrio, las vibraciones se expresan como un gran número de ondas estacionarias, mientras que tras la desconexión de la fuente sonora únicamente conservan sus modos normales de vibración amortiguándose gradualmente de forma exponencial.

2.2.3.1 Ecuación de onda

Debido a la complejidad de solución de la ecuación de onda para el estudio del caso práctico se emplea un recinto paralelepípedo de dimensiones x , y , z en el que las características de las paredes son la rigidez y sin absorción.

La ecuación de onda que determina la propagación de las ondas sonoras en cualquier fluido y sin pérdidas es la siguiente.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\rho_0}{k} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (17)$$

Donde:

p : presión sonora [Pa].

x, y, z : coordenadas cartesianas de propagación [m].

ρ_0 : densidad volumétrica del fluido (aire $\rightarrow 1,2 \cdot 10^{-3}$ [g/cm³] a 20°C).

k : rigidez volumétrica o módulo de compresión ($1,4 \cdot 10^6$ [μbares]).

c : velocidad de propagación de la onda sonora [ms⁻¹].

En caso de que las magnitudes acústicas únicamente dependan de la evolución temporal y de una única dirección, la ecuación de onda sería la siguiente para la dirección x .





$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (18)$$

Siendo la solución de especial importancia a la ecuación de onda la siguiente.

$$p(x, t) = A \cdot e^{j(\omega t - kx)} + B \cdot e^{j(\omega t + kx)} \quad (19)$$

Donde A y B son constantes arbitrarias (reales o complejas) que se determinarán a partir de las condiciones iniciales y las condiciones frontera.

Ante las siguientes condiciones de contorno definidas para una sala rectangular con paredes rígidas y pesadas con impedancia infinita (recinto sin amortiguamiento) y suponiendo que k_i depende de sus respectivas direcciones i , la solución a la ecuación de onda debe satisfacer la condición que se expresa en la ecuación 20.

$$\begin{array}{llllll} x = 0 & x = l_x & Zp = \infty & \rightarrow & V_x(0) = 0 & V_x(l_x) = 0 \\ y = 0 & y = l_y & Zp = \infty & \rightarrow & V_y(0) = 0 & V_y(l_y) = 0 \\ z = 0 & z = l_z & Zp = \infty & \rightarrow & V_z(0) = 0 & V_z(l_z) = 0 \end{array}$$

Donde Zp es la impedancia acústica de la pared y V_i es la velocidad vibratoria en la dirección i , cumpliendo la ecuación de Helmholtz por las condiciones de desprecio de disipación.

Si se supone una dependencia temporal de la presión sonora siguiendo una ley armónica $p = e^{j\omega t}$ y conociendo que el número de onda se puede escribir como $k = \omega/c$ la ecuación de onda resultante para una sala rectangular es la siguiente.

$$\nabla^2 p + k^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (20)$$

Obteniendo para las tres dimensiones la ecuación de onda presente en la ecuación 21, teniendo en cuenta que el número de onda se puede expresar como una suma cuadrática de los números de onda en cada una de las direcciones existentes $k = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$.

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_x^2 p \right) + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k_y^2 p \right) + \left(\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k_z^2 p \right) = 0 \quad (21)$$

Cada condición límite depende de una sola coordenada, por lo que la solución general será el producto de tres soluciones, dependiendo cada una de ellas de una coordenada $p(x, y, z) = p_1(x) + p_2(y) + p_3(z)$.

Para cada una de las dimensiones $p_n(i)$ se debe satisfacer la condición $(\partial^2 p_n / \partial i^2) + k_i^2 p_n = 0$ además de cumplir las condiciones límite expuestas anteriormente.



Por tanto, finalmente las soluciones para cada una de las dimensiones (x, y, z) serán las siguientes.

$$p_{n_x}(x) = 2p \cdot \cos[k_{n_x} \cdot x] = 2p \cdot \cos \left[\left(\frac{n_x \cdot \pi}{l_x} \right) \cdot x \right] \quad n_x = 0,1,2,3... \quad (22)$$

$$p_{n_y}(y) = 2p \cdot \cos[k_{n_y} \cdot y] = 2p \cdot \cos \left[\left(\frac{n_y \cdot \pi}{l_y} \right) \cdot y \right] \quad n_y = 0,1,2,3... \quad (23)$$

$$p_{n_z}(z) = 2p \cdot \cos[k_{n_z} \cdot z] = 2p \cdot \cos \left[\left(\frac{n_z \cdot \pi}{l_z} \right) \cdot z \right] \quad n_z = 0,1,2,3... \quad (24)$$

2.2.3.2 Modos propios

Se define como la distribución de presión en el espacio para una determinada frecuencia propia o de resonancia, los modos propios son cada solución de la ecuación de onda una vez aplicadas las condiciones límite establecidas. Dependen del número de onda, y por tanto de la frecuencia, dando lugar a un perfil de presión con una distribución específica de máximos y mínimos que se pueden observar en la figura 13.

Concretamente la distribución de la presión de una sala rectangular sin amortiguamiento se expresa mediante la siguiente ecuación de onda estacionaria asociada a un modo propio.

$$p_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos \left(\frac{n_x \cdot \pi}{l_x} \cdot x \right) \cos \left(\frac{n_y \cdot \pi}{l_y} \cdot y \right) \cos \left(\frac{n_z \cdot \pi}{l_z} \cdot z \right) \quad (25)$$

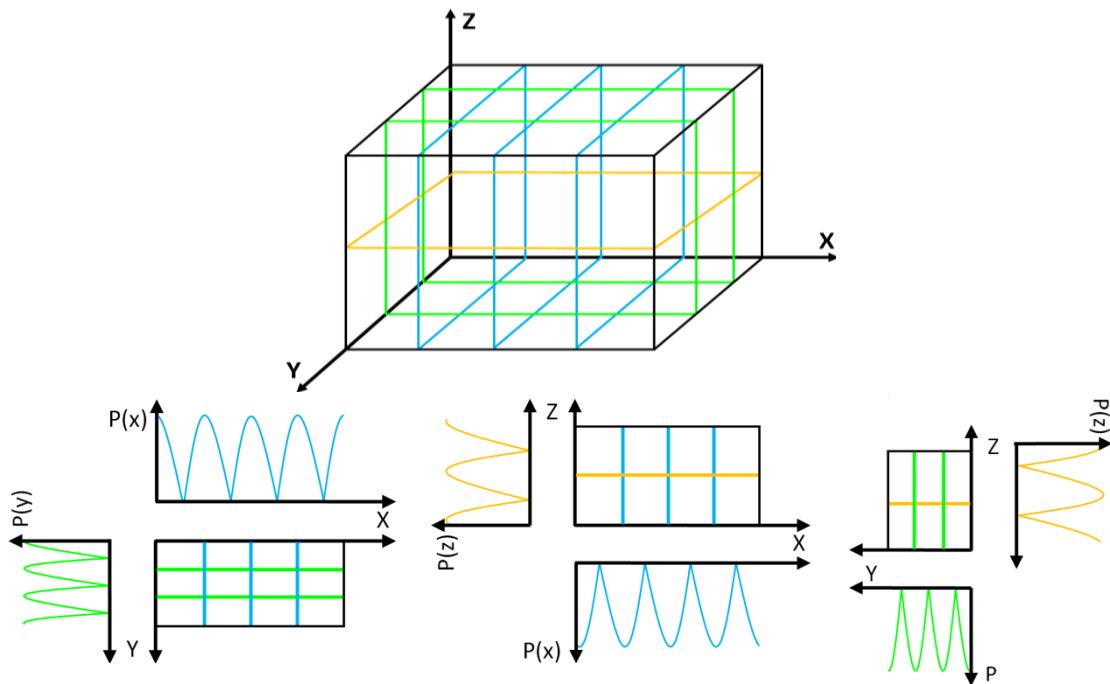


Figura 13. Planos pertenecientes al modo propio (3, 2, 1).



Cada combinación n_x , n_y , n_z , son los diferentes modos propios que se producen a una determinada frecuencia de resonancia. La figura 13 muestra un ejemplo de representación de los planos correspondientes un modo propio y la distribución de la presión en la sala en función del modo presente.

El número de modos propios ilimitado aumentando su densidad conforme aumenta la frecuencia. Este efecto se debe a la aparición de ondas estacionarias que provienen de las interferencias constructivas y destructivas producto de la combinación de ondas incidentes y reflejadas en el interior de un recinto. La presencia de todos ellos confiere una sonoridad especial a cada recinto dado que se producen concentraciones de energía alrededor de las frecuencias propias, es el denominado efecto coloración [7].

Las frecuencias propias asociadas a cada uno de los diferentes modos propios dependen de las dimensiones y geometría del recinto. Para el caso de una sala rectangular se obtiene la ecuación de *Rayleigh* que determina las frecuencias propias a partir del número de onda.

$$f_{(n_x, n_y, n_z)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (26)$$

En el supuesto de considerar una fuente sonora radiando en una de las esquinas del recinto, la energía suministrada es soportada por el campo de ondas estacionarias originadas en el recinto, formándose como consecuencia de esto ondas que se propagan en distintas direcciones. Estas ondas reciben una denominación diferente en función de la dirección atribuida especificándose de forma gráfica sobre la siguiente figura.

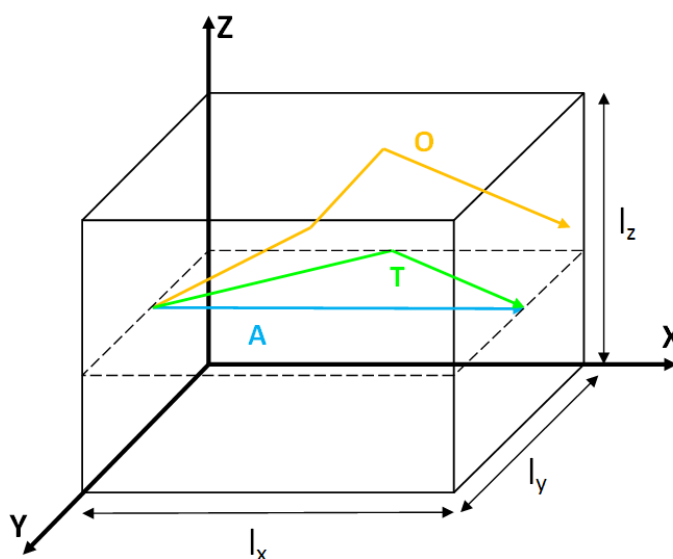


Figura 14. Distribución de ondas axiales, tangenciales y oblicuas.

Aquellas ondas que se propagan de forma paralela a los ejes x , y , z reciben el nombre de ondas axiales, representadas en color azul se caracterizan por ser dos de sus valores n_x , n_y , n_z , iguales a cero.



Las ondas que se distribuyen paralelamente y se forman como resultado de la reflexión de más superficies se denominan ondas tangenciales, representadas en color verde se caracterizan por ser uno de sus valores n_x, n_y, n_z igual a cero.

Por último, existen ondas que se forman por la reflexión en todas las superficies, recibiendo el nombre de ondas oblicuas, representadas en color naranja y caracterizadas por ser todos sus valores n_x, n_y, n_z distintos de cero.

Siendo la densidad de modos propios de frecuencia comprendidas en un intervalo f a $(f + \Delta f)$ la siguiente.

$$\frac{\Delta N_f}{\Delta f} = \frac{4}{3} \pi V \left(\frac{f}{c} \right)^2 + \frac{\pi S}{2} \left(\frac{f}{c} \right) + \frac{L f}{2 c} \quad (27)$$

Donde el primer sumando se corresponde con el número de modos oblicuos, el segundo sumando al número de modos tangenciales y el tercer sumando al número de modos axiales inferiores a una frecuencia dada.

Como la aparición de modos propios es un efecto inevitable, es importante la correcta elección de la geometría de la sala de forma que una vez combinados los modos, se puedan distribuir de forma uniforme en el espacio resultando un nivel de presión sonora lo suficiente difuso, evitando concentraciones en bandas estrechas de frecuencia (coloración en frecuencia) [4].

Respecto a las dimensiones de la sala, existen estudios realizados para ciertas proporciones de largo-ancho-alto. Para ello en la siguiente figura se representa un diagrama que permite la homogeneidad de modos propios en un recinto en función de sus medidas, mostrando un conjunto de relaciones recomendadas entre el ancho y el largo de una sala, suponiendo una altura de valor igual a uno, denominado diagrama de *Bolt*.

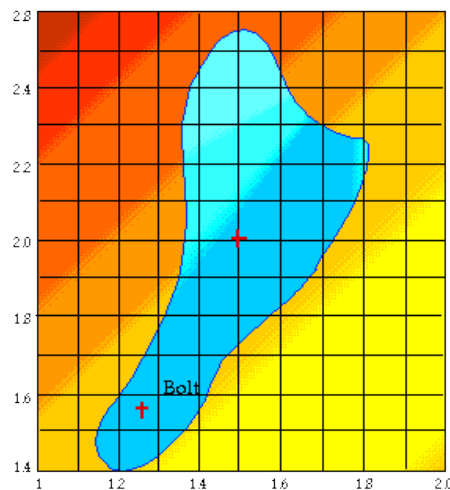


Figura 15. Diagrama de Bolt, para una distribución uniforme de frecuencias propias [5].



Teniendo en cuenta que la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia, existe una frecuencia a partir de la cual la coloración del sonido, debida a la influencia de modos propios, deja de tener sentido.

Esto se debe al hecho de que dejan de existir concentraciones discretas de energía, llegando a la conclusión que una gran presencia de modos propios equivale a la ausencia de los mismos, es decir, al existir una cercanía tan estrecha en frecuencia entre modos, ninguno destacará por encima del resto, siendo menos evidente su influencia negativa.

Siendo la frecuencia más baja a la que se produce un modo propio la denominada frecuencia de corte cuya ecuación es la siguiente [1].

$$f_{c(n_x, n_y, n_z)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{l_{\max}}\right)^2} = \frac{c}{2 \cdot l_{\max}} \quad (28)$$

2.2.4 Psicoacústica

La psicoacústica es la teoría que describe los conceptos y fenómenos relacionados con la percepción del sonido, se encarga de examinar y modelar las características de la audición humana que permiten identificar y localizar la fuente de un sonido percibido, trabaja con conceptos totalmente subjetivos debido a la variedad de gustos, e incluso la propia audición, en función de cada persona.

2.2.4.1 Sistema auditivo

En el campo de la psicoacústica se hace necesario definir el concepto audición, referido a la percepción que el oído humano hace de los sonidos emitidos, es decir, la excitación que se produce en el cerebro humano al captar un sonido.

Para ello es necesario establecer una analogía entre el aparato auditivo y un sistema electrónico de audio, ya que el sistema auditivo no es independiente de la frecuencia, sino todo lo contrario.

Dos sonidos de igual presión sonora pueden provocar distintas sensaciones de intensidad o sonoridad en un oyente, por ello es preciso analizar la anatomía del oído humano y su funcionamiento, ya que cada uno de los dos oídos de un oyente trabaja de forma independiente, captando la señal sonora e interpretando el cerebro posteriormente el sonido percibido.

A continuación se presenta un esquema de las diferentes partes que componen el oído humano para poder definir su comportamiento.



Figura 16. Anatomía del oído humano [6].

Representada la figura 16, es necesario definir la función de cada una de las partes que conforman el sistema auditivo humano. Comenzando por el oído externo, encargado de captar la señal sonora actuando como un resonador a 3 kHz. La parte correspondiente al oído medio actúa como amplificador de la señal, o bien como atenuador en caso de una fuerte excitación, además de ejercer la función de un adaptador de impedancias al pasar la señal desde el aire al líquido linfático. Finalmente, el oído interno actúa como transductor transformando la información cinética de la señal en impulsos nerviosos.

La banda de frecuencias audibles en un oyente oscila entre las frecuencias de 20 Hz a 20 kHz, sin embargo la sensibilidad ante todo el margen de frecuencias no es la misma, por ello en la siguiente figura se puede observar que en baja frecuencia se precisa de un nivel más alto de presión sonora de para que la sonoridad percibida sea la misma que a frecuencias medias.

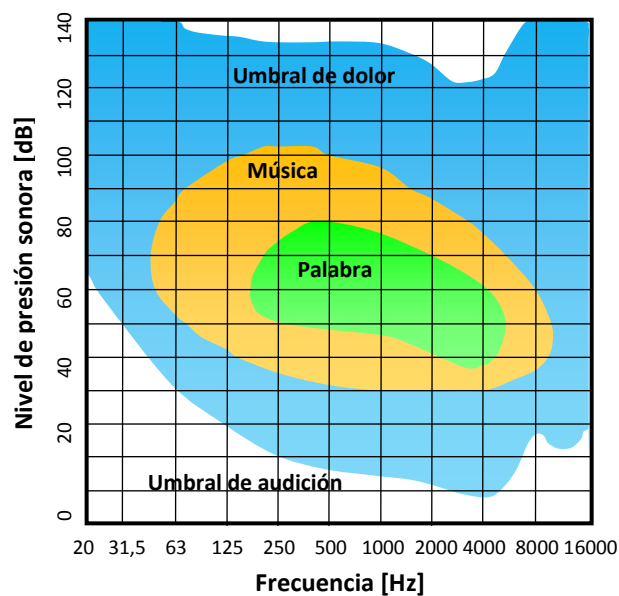


Figura 17. Niveles audibles y zonas de reproducción en función de la frecuencia [4].



Según la figura 17 existen umbrales de nivel de presión sonora que van desde el sonido débil y casi imperceptible por el oído (umbral de audición) hasta el sonido fuerte que se limita cuando aparece la sensación de dolor en el oído (umbral de dolor). No obstante, la capacidad de la persona como receptora de sonido es mucho mayor que como emisora.

El umbral de audición también depende del ángulo de incidencia del sonido hacia el oído, en la figura 17 se representa la incidencia frontal en campo libre y las fluctuaciones que aparecen a partir de 2 kHz se deben a la perturbación del campo sonoro con la cabeza, cuya anchura es comparable a la longitud de onda a esa frecuencia.

2.2.4.2 Sonoridad

El oído humano no tiene un comportamiento lineal en función de la frecuencia ni en función del nivel de presión sonora, este comportamiento se deduce de las curvas umbral máximo y mínimo, haciéndose necesario un valor representativo de éste fenómeno, el nivel de sonoridad.

$$L_n = L_p(1 \text{ kHz/dB})[\text{fonios}] \quad (29)$$

El nivel de sonoridad representa el nivel de un tono puro a una frecuencia cualquiera, el cual tiene una sonoridad como un tono de referencia de 1 kHz a 40 dB, 80 dB y 120 dB, es decir, es el nivel de intensidad que tiene que tener un tono distinto de 1 kHz para que el oyente lo perciba a la misma intensidad sonora que un tono de 1 kHz.

Esta magnitud se define como la comparación de un sonido con otro estandarizado. La unidad de medida utilizada para medir este nivel es el fonio, define la sonoridad de un sonido sinusoidal de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 0 dB.

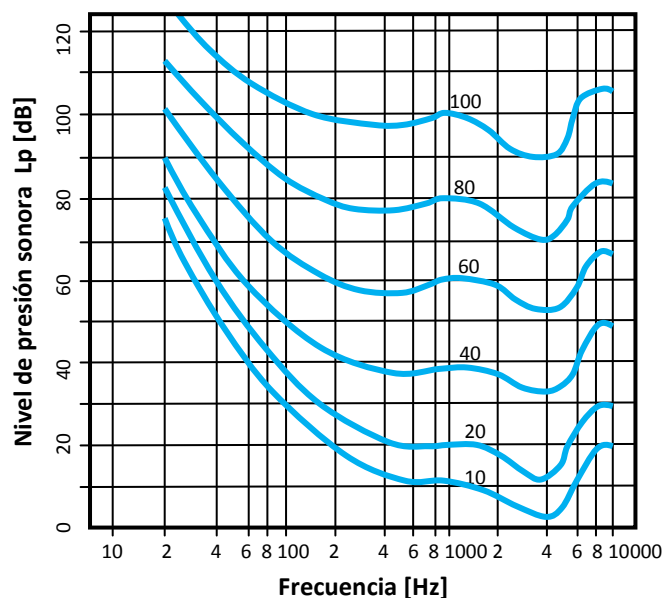


Figura 18. Curvas isofónicas de sensibilidad del oído de Fletcher-Munson [4].



De esta forma se obtiene una curva para cada valor del nivel de presión sonora de la frecuencia de referencia, denominadas curvas isofónicas de *Fletcher-Munson*.

Otro concepto introducido por *Fletcher-Munson* es el comportamiento del oído como un conjunto de filtros paso banda conectados en paralelo a cuyo ancho de banda es denominado ancho de banda crítico. Si el ancho de banda de una señal es pequeño, esta se percibirá con igual sonoridad, independientemente de lo ancha que sea la banda del sonido estimulante [4].

2.2.4.3 Localización suma

Cuando se consideran diferencias de nivel o retardos pequeños, el sistema auditivo establece la posición del suceso auditivo interpretando la resultante de dos señales de entrada a los oídos, como si se originasen en una única fuente sonora, dependiendo de la posición del suceso auditivo de la señal radiada por las fuentes sonoras y sus posiciones.

Si las fuentes tienen el mismo nivel, el suceso se sitúa en el plano medio, y conforme se añade un retardo a uno de ellos, el suceso sonoro se desplazará localizándose la dirección del suceso auditivo en el altavoz que emita primero. Cuando se consideran diferencias de nivel o retardos pequeños, el sistema auditivo establece la posición del suceso auditivo, interpretando la resultante de las dos señales de entrada a los oídos como si se originasen en una única fuente sonora.

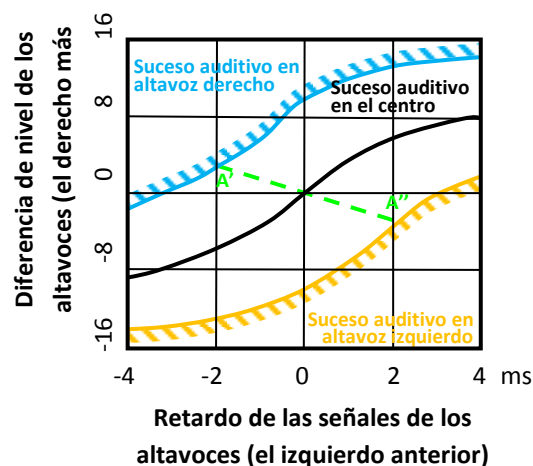


Figura 19. Diferencias de nivel y de retardo simultáneas [4].

Donde, en la figura 19, la línea A'-A'' representada en color verde pertenece a la línea de trabajo característica para un proceso de transmisión estereofónica de forma que actuando sobre la gráfica se puede localizar el suceso sonoro.

Si los altavoces se sitúan delante y detrás en el plano medio respecto del frontal, la precisión de localización del suceso es mucho menor debido a que el recorrido de las señales es el mismo hacia el oído, generándose determinados retardos para distintas frecuencias, cancelaciones o máximos.





2.2.4.4 Ley del primer frente de onda

Si el retardo continúa aumentando por encima de 0,6 ms hasta 1 ms, el suceso sonoro se situará en el altavoz que radie la primera señal. Sin embargo, con un retardo superior a 1 ms no se aprecia la variación del suceso sonoro, permaneciendo constante. Este efecto es aplicable a la totalidad de direcciones de incidencia del sonido.

Basado en la disposición estereofónica de altavoces que caracteriza a la localización suma, la transición a la localización suma define el límite inferior de la gama de retardos para el cual es aplicable la ley del primer frente de onda denominada por *Cremer*.

Sin embargo, el establecimiento del límite superior de la ley del primer frente de onda es difícil de determinar, ya que en función del aumento del retardo los cambios detectables producidos, a parte del cambio de dirección, son el aumento de la sonoridad, la variación del timbre o el ensanchamiento aparente de la fuente sonora. Este tipo de cambios tienen dependencia del nivel del sonido, la dirección de incidencia y el tipo de señal [8].

2.2.4.5 Enmascaramiento

Es el umbral de percepción de las reflexiones, o lo que es lo mismo, cuando la diferencia entre el sonido primario y la primera reflexión es totalmente perceptible.

Si el retardo supera 1 ms, el suceso auditivo es más sonoro y de mayor extensión, desplazándose la percepción de la fuente hacia la dirección de la reflexión, es decir, es un efecto que se produce al percibir dos o más sonidos producidos de forma simultánea o próxima en el tiempo, en el que uno de ellos impide que el otro sea percibido.

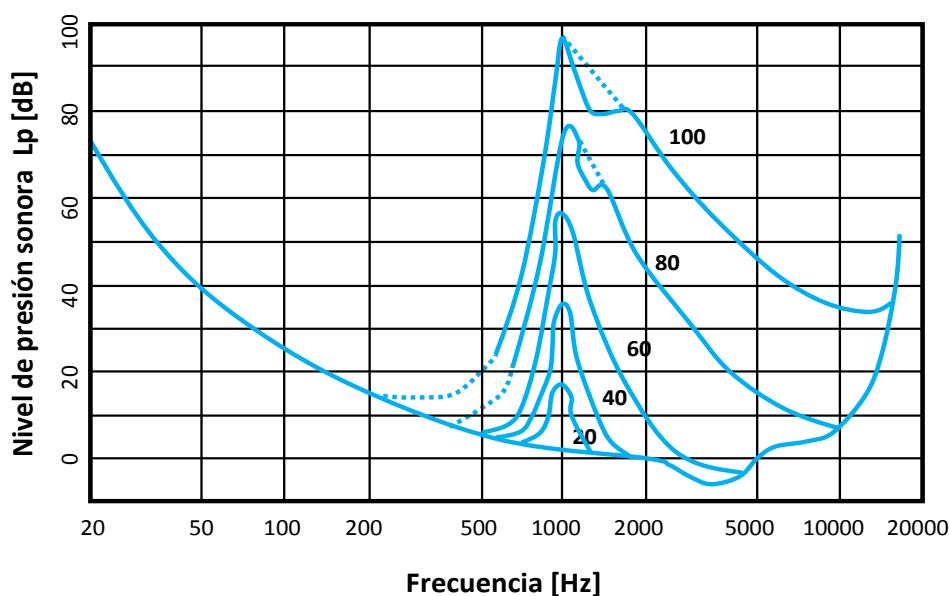


Figura 20. Efecto enmascarante en el margen de frecuencias audibles [6].



A bajos niveles, el enmascaramiento está comprendido en una banda estrecha alrededor de la frecuencia central del ruido, produciendo una señal de banda estrecha de ruido más el efecto que un tono puro de la misma intensidad centrado en la misma frecuencia.

Sin embargo, alrededor de la frecuencia central del ruido enmascarante no se produce un efecto simétrico, sino que las frecuencias situadas por encima de ésta son enmascaradas más fácilmente que las que se sitúan por debajo. En caso de que dos sonidos no coincidan temporalmente, el efecto de enmascaramiento puede deberse a la respuesta no inmediata del oído, pudiéndose utilizar estos efectos de forma negativa [9].

2.2.4.6 Umbral de eco

Se define como el límite superior de validez de la ley del primer frente de onda, ya que sigue aumentando el retardo y el suceso sonoro se divide en dos direcciones diferentes, a partir de ese instante aparece el umbral de eco, definido como el retardo más corto para el que llega a ser audible el segundo suceso auditivo.

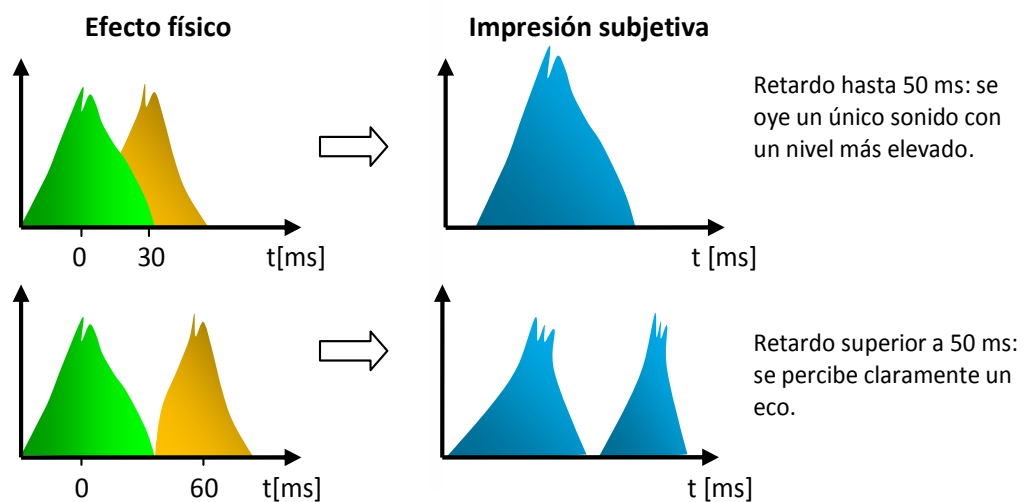


Figura 21. Impresión subjetiva de dos sonidos con diferentes retardos.

Si el retardo es menor de 32 ms, el nivel de reflexión puede ser incluso 5 dB más alto que el sonido primario, sin que el eco llegue a ser audible.

Con un retardo de 15 ms, el nivel de la reflexión debe superar 10 dB por encima del sonido directo para que se produzca un suceso auditivo igualmente sonoro.

A partir de un retardo de 65 ms el eco se considera molesto, es decir, para valores umbrales que intersecten la curva de igual sonoridad, y aumenta a medida que decrece.

Sin embargo, para retardos menores de 50 ms los ecos ya no son percibidos como molestos, incluso cuando la reflexión es más potente que el sonido directo.





2.3 Características de la palabra

La señal de voz es una onda de presión sonora como puede ser la música, sin embargo la voz es quizá es mejor ejemplo de señal acústica con mayor complejidad, abstracción y cantidad de información adjunta.

La razón del estudio de las características de la voz hablada en este proyecto se debe a que el principal uso del recinto objeto de estudio es la representación teatral.

2.3.1 Fisiológicas

Desde un punto de vista fisiológico, la señal vocal se produce al expulsar el aire contenido en los pulmones a través de la tráquea y atravesando la laringe donde se encuentran las cuerdas vocales, de forma que éstas se tensan vibrando cuando el flujo de aire las atraviesa, generando la señal de voz.

A continuación, la señal pasa por el tracto vocal, compuesto por la cavidad faríngea, oral y nasal encargadas de dar forma al flujo de aire con el fin de producir un fonema u otro dando al espectro de la señal la envolvente deseada. Finalmente la señal de voz será radiada a través de la boca y los orificios nasales.

Todo este proceso será controlado por el cerebro que indica a cada uno de estos elementos como debe colocarse para emitir el mensaje deseado.

2.3.2 Temporales

Se considera que las vocales constituyen el régimen permanente del habla, mientras que las consonantes constituyen el régimen transitorio. La explicación reside en que el tiempo empleado en emitir una vocal es mayor que el empleado para emitir una consonante, siendo 90 ms y 20 ms respectivamente.

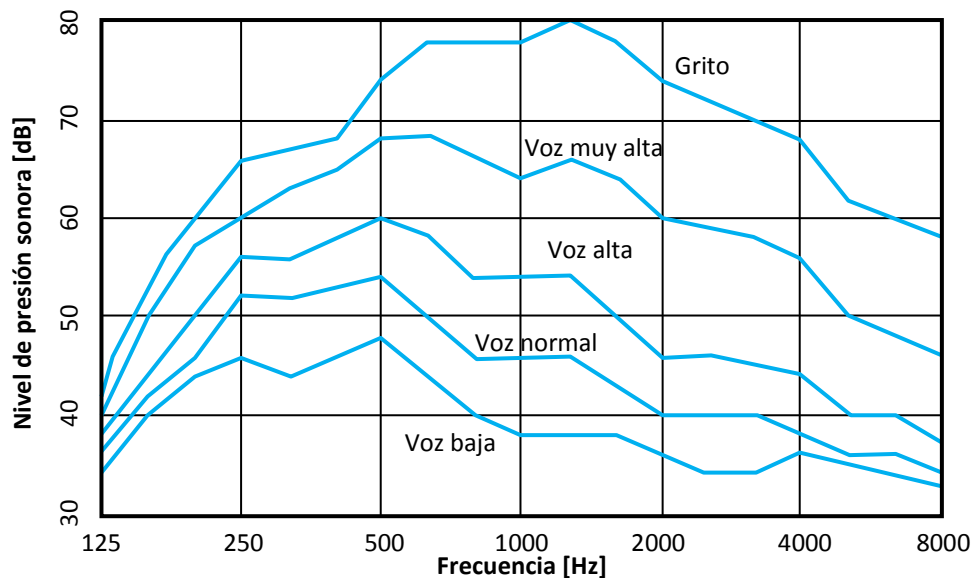
Además, el nivel de presión sonora asociado a las vocales es aproximadamente 12 dB mayor que el correspondiente a las consonantes.

2.3.3 Espectros y niveles

Los sonidos de la voz varían de una forma muy amplia, tanto en nivel de presión sonora como en contenido frecuencial. En cuanto a la distribución frecuencial de los fonemas, las vocales contienen principalmente un alto contenido en baja frecuencia, mientras que las consonantes poseen una mayor distribución en alta frecuencia. La inteligibilidad está relacionada con la correcta percepción de la alta frecuencia, es decir, la correcta percepción de las consonantes, siendo el rango de frecuencias que abarca la voz masculina desde 100 Hz hasta 8 kHz mientras que el de una mujer es de 200 Hz a 9 kHz.



En la siguiente figura se muestra la representación de los niveles de presión sonora, para diferentes niveles de intensidad, producidos por una persona hablando.



CONTRIBUCIÓN AL NIVEL DE LA VOZ						
125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
7%	22%	46%	20%	3%	2%	
	5%	13%	20%	31%	26%	5%
CONTRIBUCIÓN A LA INTELIGIBILIDAD DE LA PALABRA						

Figura 22. Contribución frecuencial al nivel de la voz e inteligibilidad de la palabra.

Como se aprecia en la figura 22, la banda que más contribuye a la señal de la voz se encuentra en torno a los 500 Hz (46%), por el contrario la máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra se encuentra en frecuencias más altas (57%) sumando a la contribución en 2 kHz y 4 kHz.

2.3.4 Directividad

La directividad es un factor importante cuando se trata de señales como la voz debido a que posee diferente directividad en función de la frecuencia. Debido al funcionamiento del propio sistema de fonación o por la propia forma de la cabeza. Cabe destacar que en frecuencias altas es donde más se ve reducida esta radiación, ya que son precisamente éstas las más importantes para la inteligibilidad de la palabra.

Como se puede apreciar en la figura 3 perteneciente al apartado 2.1.1.3 de este proyecto, la directividad aumenta con la frecuencia y es mayor en la dirección frontal, considerándose a efectos prácticos, un factor $Q = 2$. Además, la percepción es menor en la parte posterior del locutor y la diferencia delante-detrás es más notable en la banda de 4 kHz por ser la voz más directiva a medida que aumenta la frecuencia.



CAPÍTULO III

PARÁMETROS PARA LA VALORACIÓN ACÚSTICA DE SALAS



3. PARÁMETROS PARA LA VALORACIÓN ACÚSTICA DE SALAS

El objetivo de este apartado es proporcionar una serie de parámetros que permitan caracterizar de forma fiel las propiedades acústicas del Teatro Tomás y Valiente, definiéndolos de forma que se obtengan la mayoría de respuestas a la hora de preguntar qué medida realizar para poder evaluar las diferentes características, situaciones y problemas acústicos presentes en la fase de análisis.

A continuación, en los sucesivos apartados de este capítulo se definen los requisitos acústicos para salas destinadas a reproducción de voz y música.

3.1 Nivel de presión sonora

El campo sonoro se caracteriza mediante el nivel de presión sonora, tanto en espacios abiertos como cerrados, el cual se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora respecto a la presión de referencia.

$$L_p [\text{dB}] = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (30)$$

Donde p_0^1 es la presión de referencia, de forma que todos los sonidos audibles son representados por valores positivos.

Para conseguir convertir el nivel de presión sonora registrado al nivel que sería percibido por el oído humano se utiliza la curva de ponderación A de forma que se compensan las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene ante las distintas frecuencias dentro del campo auditivo que corrige el nivel de presión sonora.

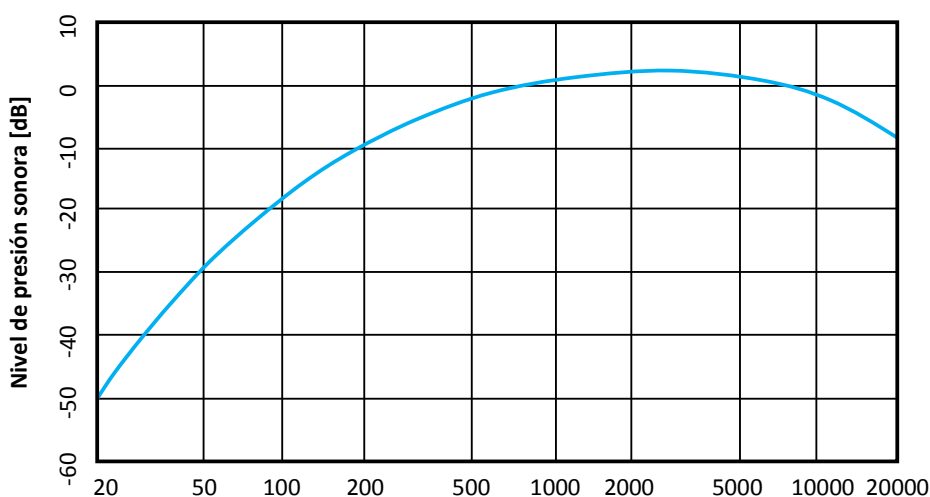


Figura 23. Valores de corrección de la curva de ponderación A.

¹ Presión de referencia ($p_0 = 20 \mu\text{Pa}$), valor eficaz de la presión umbral de audición a 1 kHz.





3.2 Tiempo de reverberación

Indica la vivacidad de una sala, de forma que cuando el valor del tiempo de reverberación es alto se trata de un recinto “vivo”, pero si es bajo, se trata de un recinto “apagado”.

La viveza se relaciona fundamentalmente con los tiempos de reverberación elevados en las frecuencias medias y altas, aquellas por encima de los 350 Hz. Sin embargo, una sala puede sonar viva y ser deficiente en bajos, pero si un recinto es suficientemente reverberante a frecuencias bajas, se dice que la sala suena cálida.

A pesar de que las medidas se efectúen para cada una de las frecuencias características en tercios de octava, existe un valor único de tiempo de reverberación para una sala referido a aquel que se obtiene de la media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz, representándose como T_{mid} .

$$T_{mid} [s] = \frac{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1 \text{ kHz}}}{2} \quad (31)$$

Además, el valor óptimo del tiempo de reverberación de salas para la palabra puede calcularse en función del volumen aplicando las siguientes expresiones.

$$T_{mid \text{ op max}} [s] = 0,368 \cdot V^{0,1505} \quad (32)$$

$$T_{mid \text{ op min}} [s] = 0,264 \cdot V^{0,1394} \quad (33)$$

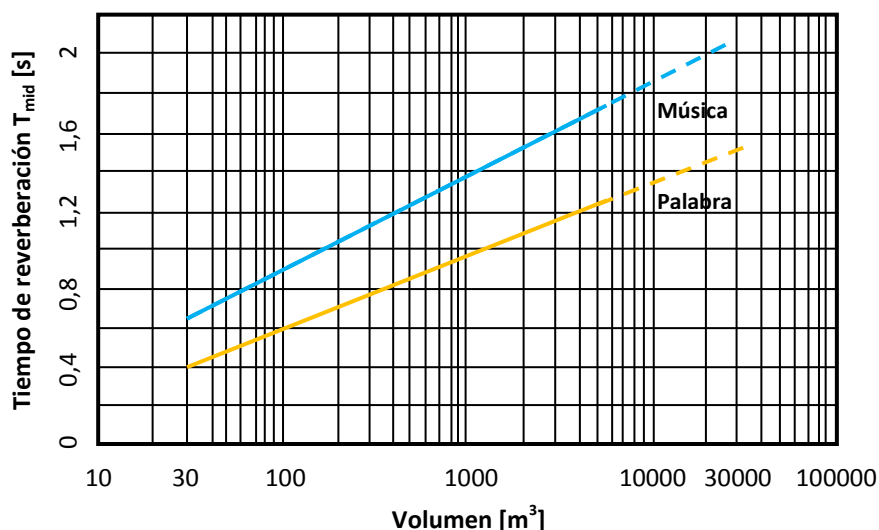


Figura 24. Valores recomendados de T_{mid} en función del volumen del recinto [16].

La curva tonal se define como la representación del tiempo de reverberación en función de la frecuencia y debe ser lo más uniforme posible. Los valores de tiempo de reverberación deben ser lo más constantes posible e intentar variar lo mínimo en función del porcentaje de ocupación de la sala, escenografía, y otros parámetros no fijos.



I. Valores óptimos para la palabra

Las condiciones acústicas óptimas para teatros poseen dimensiones que llevan a unas 1500 localidades, situándose el valor óptimo del T_{mid} para la palabra entre 1,1 s y 1,2 s. Sin embargo, para teatros más pequeños con capacidad para unas 500 localidades T_{mid} adoptado para la palabra posee un valor cercano a 1 s.

II. Valores óptimos para música

En el caso de que la representación llevada a cabo sea musical, en recintos de gran volumen los requisitos del tiempo de reverberación T_{mid} variarán entre los valores que se presentan en la siguiente tabla en función del tipo de música-

T_{mid} [s]	Tipo de música
1,8 – 2,0	Música sinfónica
1,6 – 1,8	Música barroca y clásica
1,3 – 1,7	Música de cámara
1,2 – 1,5	Ópera

Tabla 1. Intervalos T_{mid} recomendados en función del tipo de música [12].

3.2.1 Brillo

El brillo es un índice que se obtiene a partir del tiempo de reverberación. Un sonido claro, rico en armonía se denomina “brillante” caracterizado por la prominencia de las altas frecuencias y su lento decaimiento.

La expresión que permite obtener un valor objetivo del brillo del sonido presente en la sala se representa a continuación, siendo su función relacionar la respuesta de las altas frecuencias respecto de las medias [12].

$$Br = \frac{T_{2 \text{ kHz}} + T_{4 \text{ kHz}}}{T_{500 \text{ Hz}} + T_{1 \text{ kHz}}} \quad (34)$$

I. Valores óptimos para la palabra

Las condiciones de brillo óptimas para una sala destinada a reproducción de voz se sitúan en torno a los siguientes valores recomendados ($0,9 \leq Br \leq 1,2$).

II. Valores óptimos para música

Para una sala destinada a reproducción de música el valor óptimo de este parámetro se sitúa entre los valores $0,8 < Br < 1$, siendo preferible que $Br \geq 0,87$ según la recomendación de Beranek para salas de conciertos ocupadas.





3.2.2 Calidez

Definido como la plenitud tonal de las bajas frecuencias, la calidez es un índice que relaciona el tiempo de reverberación de las bajas frecuencias respecto de las medias. Una sala se define como “oscura” cuando la influencia de las bajas frecuencias es alta o cuyas altas frecuencias están muy atenuadas.

Como medida objetiva de calidez acústica se utiliza el parámetro *Bass Ratio* (BR) definido en la siguiente expresión [11].

$$BR = \frac{T_{125\text{ kHz}} + T_{250\text{ Hz}}}{T_{500\text{ Hz}} + T_{1\text{ kHz}}} \quad (35)$$

I. Valores óptimos para la palabra

Las condiciones de calidez óptimas para una sala destinada a reproducción de voz se sitúan en torno a los siguientes valores $0,9 \leq BR \leq 1,2$ recomendados.

II. Valores óptimos para música

Para una sala destinada a reproducción de música el valor óptimo de calidez en un sala se sitúa entre los valores $1,1 < BR < 1,3$ recomendados.

3.2.3 Tiempo de caída inicial

El parámetro EDT (*Early Decay Time*)², mide la primera parte del proceso de descenso de energía, a la cual es más sensible el oyente. Este parámetro mide el tiempo de extinción a -60 dB siguiendo la pendiente de caída de los primeros 10 dB.

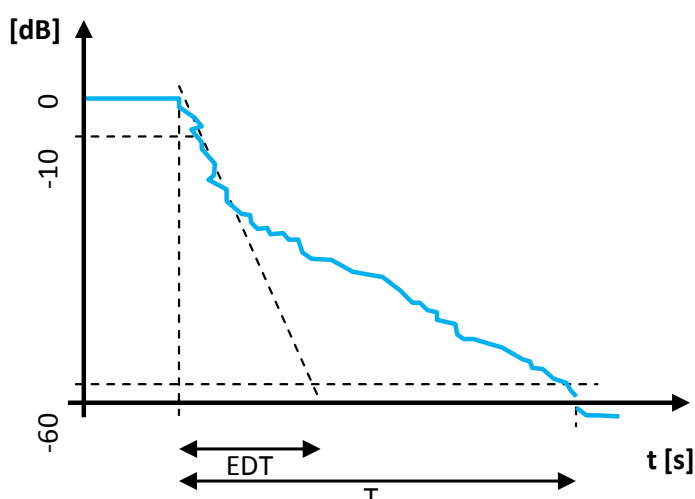


Figura 25. Decaimiento de la energía sonora de un recinto relacionando EDT y T.

² El acrónimo **EDT** define el tiempo de reverberación temprano o tiempo de caída inicial, *Early Decay Time*.



En un espacio muy difuso donde la caída sea completamente lineal deberían coincidir los parámetros T y EDT, significando un predominio de EDT sobre T una mayor presencia del campo directo y de las primeras reflexiones.

I. Valores óptimos para la palabra

Para salas destinadas a reproducción de voz se recomienda que el parámetro EDT posea un valor ligeramente inferior a T_{60} , de forma que se asegure la condición de una buena inteligibilidad y buen índice de definición D que se definirá posteriormente.

II. Valores óptimos para música

Para el caso de la música es recomendable que el valor de EDT sea prácticamente igual a T_{60} , de forma que se cumpla la condición de espacio difuso.

3.3 Respuesta al impulso

Para obtener la respuesta al impulso de una sala se emplea el impulso temporal ideal o delta de Dirac, un impulso de corta duración y potencia elevada que excita la sala a todas las frecuencias con la misma energía. A partir de la respuesta al impulso se obtienen la mayoría de los parámetros acústicos de un recinto. En su representación temporal denominada ecograma, se detectan fácilmente posibles ecos o reflexiones indeseadas.

3.3.1 Intimidad acústica

El ITDG (*Initial Time Delay Gap*)³, se define como un parámetro que establece la conexión entre el oyente y la fuente, siendo el intervalo temporal de retardo inicial establecido desde la llegada de la energía directa hasta la primera reflexión.

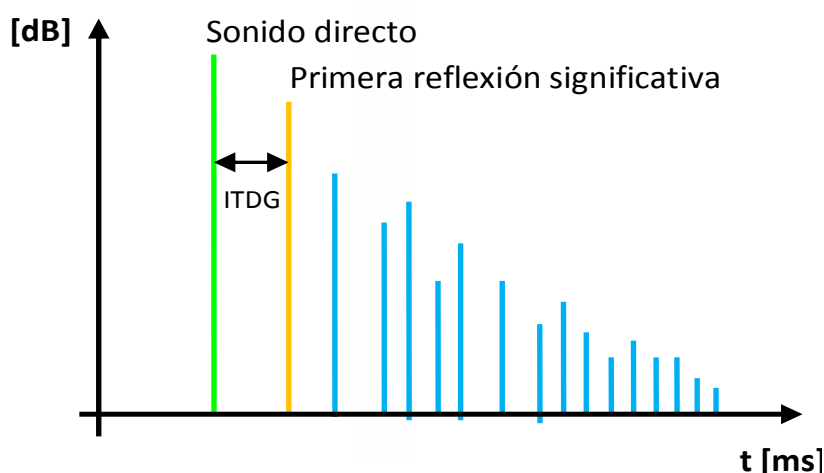


Figura 26. Obtención de ITDG a partir de un ecograma.

³ ITDG es el acrónimo que define la intimidad acústica mediante el intervalo temporal de retardo inicial, *Initial Time Delay Gap*.





Este parámetro está relacionado con el concepto subjetivo cerca de la sensación que tiene el oyente al escuchar el sonido en un espacio de dimensiones menores a las reales, indicando el grado de conexión entre el oyente y la fuente sonora, es decir, permite establecer si el receptor se siente inmerso o distante de la actividad hablada o musical emitida.

El valor recomendado para este parámetro varía en función de diferentes autores. Según el criterio de Beranek se recomienda un valor de $IDTG \leq 20$ ms, considerando los valores superiores a 40 ms como no aceptables [11].

3.4 Factor de fortaleza

El factor G (*Strength Factor*)⁴ es la diferencia existente entre el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional, que simule voz o música, en un determinado punto de la sala y el producido por la misma fuente situada en campo libre a 10 m (nivel de referencia).

$$G [dB] = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \quad (36)$$

Donde p_A^2 es la presión sonora de referencia. El parámetro de sonoridad se corresponde con el grado de amplificación producido por la sala, dependiendo de la distancia del oyente al escenario, de la energía asociada a las primeras reflexiones, de la superficie ocupada por el público y del nivel de campo reverberante [11].

Para establecer un valor recomendado del factor de fortaleza, se usa el promedio de las bandas de octavas centradas en 500 Hz y 1 kHz.

$$G_{mid} [dB] = \frac{G_{500 \text{ Hz}} + G_{1 \text{ kHz}}}{2} \quad (37)$$

I. Valores óptimos para la palabra

Para una sala destinada a la reproducción de voz se recomienda que todos los puntos de la sala verifiquen que $G_{mid} \geq 0$ dB.

Además, los valores que verifican un factor de fortaleza óptimo G_{mid} para el recinto se encuentran entre 4 dB y 8 dB para una orientación frontal del orador. Sin embargo, para una orientación lateral los valores de G_{mid} se sitúan entre 2 dB y 6 dB.

⁴ G es la denominación del factor de fortaleza o también es denominado sonoridad, *Strength Factor*.



II. Valores óptimos para música

Cuando la señal emitida por la fuente es musical, se recomienda que G_{mid} sea el promedio en bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 kHz, con un nivel de referencia de 69 dB_{SPL}.

Para verificar un valor óptimo de G_{mid} ante una emisión musical, sus valores recomendados han de situarse entre 4 dB y 5,5 dB.

3.5 Análisis de reflexiones

En este apartado se estudian los parámetros relacionados con la energía reverberante presente en un recinto, teniendo en cuenta la relación que poseen los mismos respecto de la posición del oyente.

3.5.1 Definición

El índice de definición (D) es la relación existente entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la energía recibida total.

Definido por Thiele, es un criterio básico para estimar la inteligibilidad de la palabra que relaciona la energía procedente de las reflexiones más útiles para palabra, hasta 50 ms desde la llegada del sonido directo, respecto de la total.

Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz, expresando numerosas veces este dato en %.

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \cdot 100 \% \quad (38)$$

Cuanto más elevada es la definición, más elevada es la inteligibilidad de la palabra. Se toma como valor correcto un resultado de definición $D \geq 65\%$, siendo el mínimo exigido un 50%.

Un valor bajo de definición muestra que la energía sonora reflejada en los primeros 50 ms es pequeña en relación con la energía reflejada total y, por tanto, que el recinto es poco íntimo, el tiempo de reverberación excesivo y la sala muy viva [11].





3.5.2 Claridad

El índice de claridad (C) se define como la relación, expresada en decibelios, entre la energía sonora que llega al oyente tras los primeros milisegundos desde la llegada del sonido directo, incluyendo el sonido directo y las primeras reflexiones, y la energía que llega después del mismo periodo definido en milisegundos.

En definitiva, es el grado en que los sonidos discretos en la señal ejecutada se distinguen unos de otros. En función de si la señal emitida es voz o musical, los milisegundos definidos para la claridad musical variarán tal y como se define a continuación.

I. Valores óptimos para la palabra

En este caso C es la relación entre la energía sonora que llega al oyente los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la energía que llega tras los primeros 50 ms.

$$C_{50} [\text{dB}] = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (39)$$

Los factores de ponderación se corresponden a los porcentajes de contribución estadística aproximada de cada banda a la inteligibilidad, de forma que el valor global representativo⁵ admisible para una buena inteligibilidad es de $C_{50} > 0$ dB para recintos con una reverberación normal, y $C_{50} > -5$ dB para recintos con una reverberación más alta [12].

II. Valores óptimos para música

Cuando la señal a emitir es musical, la claridad se define como la relación entre la energía sonora útil para música (reflexiones hasta 80 ms desde la llegada del sonido directo) respecto del resto de energía (cola reverberante).

$$C_{80} [\text{dB}] = \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (40)$$

Se calcula mediante el valor promedio a 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. El valor recomendado es el margen válido para música sinfónica situado entre -2 dB y 2 dB para sala ocupada y entre -4 dB y 0 dB para sala vacía, incluso algunos autores aceptan valores de hasta 4 dB.

⁵ *Speech Average*: se define como el valor global representativo del factor C_{50} que se calcula mediante la media aritmética ponderada de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.



3.6 Sensación espacial

La sensación que permite a un oyente sentirse envuelto por el campo sonoro contribuye positivamente a la valoración subjetiva de la calidad de un recinto acústico. Esta sensación se genera cuando al oyente le llega el sonido reverberante a sus oídos por igual, es decir, cuando el grado de difusión de la sala es elevado. Si un sonido es marcadamente envolvente se dice que el grado de LEV (*Listener envelopment*) es alto.

Otro atributo relacionado con la sensación espacial es la anchura aparente de la fuente, ASW (*Apparent Source Width*), asociado con la impresión que ejerce sobre un oyente si la música ejecutada en una sala emana de una fuente de mayor amplitud que la que corresponde con la anchura visual de la fuente real.

3.6.1 Índice de difusión sonora

El SDI (*Sound Diffusion Index*) determina el grado de difusión de la sala, a través de impresión espacial y el sonido envolvente, para hallar el grado de irregularidades de las superficies que conforman un recinto.

Para valorar el grado de difusión de una sala el índice de difusión sonora se clasifica en función de las características relacionadas con la irregularidad de una superficie, ponderando los valores según la superficie asociada y ocupada.

Para una superficie con grandes irregularidades SDI = 1, mientras que para una superficie lisa SDI = 0, tomando valores comprendidos entre 0 y 1 para superficies con un grado de irregularidad intermedio [11].

3.6.2 Coeficiente de correlación Cruzada Interaural

El IACC (*Inter Aural Cross Correlation*), se define como la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos de un oyente, y es indicativo del grado de similitud existente entre las dos señales. Con el objetivo de definir su ecuación, a continuación se muestra la expresión normalizada.

$$IACC = \max_{\tau} \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t + \tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t)dt}} \quad -1 \leq \tau \leq 1 \quad (41)$$

Donde p_L y p_R es la presión instantánea asociada a los oídos izquierdo y derecho.





Si las dos señales son iguales su valor será $IACC = 1$, en caso opuesto, es decir, señales aleatorias independientes, su valor será $IACC = 0$.

El coeficiente $IACC_E$ (*Early*), se define como medida de espaciosidad en la que los tiempos correspondientes a los límites de integración t_1 y t_2 se corresponden al intervalo de tiempo comprendido entre los 5 ms y 80 ms. El coeficiente $IACC_L$ (*Late*), se define como medida de difusión del campo de sonido reverberante posterior a las reflexiones iniciales, donde los tiempos correspondientes a los límites de integración t_1 y t_2 se corresponden al intervalo de tiempo comprendido entre los 80 ms y 1 s.

Habitualmente se utilizan los valores $(1 - IACC_{E3})$ y $(1 - IACC_{E3})$ puesto que un aumento de los mismos significa una mayor disimilitud entre ambas señales y una mayor amplitud aparente de la fuente sonora. En cuanto a los valores recomendados por Beranek se establecen tres categorías para los valores medios.

$(1 - IACC_{E3})$	$(1 - IACC_{E3})$	Categoría acústica
0,66	0,88	Excelente
0,55	0,87	Muy buena
0,41	0,85	Buena

Tabla 2. Categoría acústica de la sala en función del coeficiente IACC [11].

Para una sala destinada a la emisión de señales musicales el valor recomendado se corresponde con $IACC \approx 0,7$.

3.6.3 Eficiencia lateral

El índice LF (*Lateral Energy Fraction*)⁶, es la relación entre la energía que llega lateralmente a un oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, quedando excluido, y la energía recibida en todas direcciones en dicho intervalo de tiempo.

$$LF = \frac{\int_{5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} p^2(t) \cdot \cos^2 \theta \, dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) \, dt} \quad (42)$$

Donde θ es el ángulo entre la reflexión incidente y la dirección de máxima sensibilidad del micrófono y el límite de 5 ms se introduce para intentar evitar el efecto del sonido directo.

El valor recomendado para salas de concierto vacías ha de cumplir $LF \geq 0,19$. En general cuanto más elevado sea el valor de LF, mayor será el grado de espacialidad del sonido.

⁶ LF es el acrónimo que define la Fracción de Energía Lateral o la también denominada Eficiencia Lateral.



3.7 Inteligibilidad

La inteligibilidad mide la buena transmisión del mensaje hablado a través de un recinto a través del índice de transmisión de la palabra (STI) o el índice RASTI y mediante la pérdida de articulación de consonantes (ALCons). Siendo la recomendación óptima, que la inteligibilidad en cualquier punto de la sala sea como mínimo calificada de buena.

3.7.1 Índice de Transmisión de la Palabra

El índice STI (*Speech Transmission Index*) evalúa de 0 a 1 la inteligibilidad de la palabra partiendo de la señal de voz. Se basa en el análisis de la degradación que sufre la voz al transmitirse en un recinto, debido a los efectos de la reverberación, ecos y ruido.

Como simplificación del STI surge el índice RASTI (*Rapid Speed Transmission Index*) que consigue evaluaciones de la inteligibilidad de un sistema electroacústico acorde con la apreciación subjetiva, usando las frecuencias que más afectan a la inteligibilidad del habla, siendo en total cinco frecuencias moduladoras para las bandas de octava de 2 kHz y 4 moduladoras para la banda de octava de 500 Hz.

STI / RASTI	Valoración
0,75 – 1	Excelente
0,60 – 0,75	Muy buena
0,45 – 0,60	Buena
0,30 – 0,45	Regular
0,25 – 0,30	Pobre
0 – 0,25	Inaceptable

Tabla 3. Tabla de valoración del Índice de Transmisión de la Palabra.

$$\text{RASTI} = 0,9482 - 0,1845 \cdot \ln(\text{ALCons}[\%]) \quad (43)$$

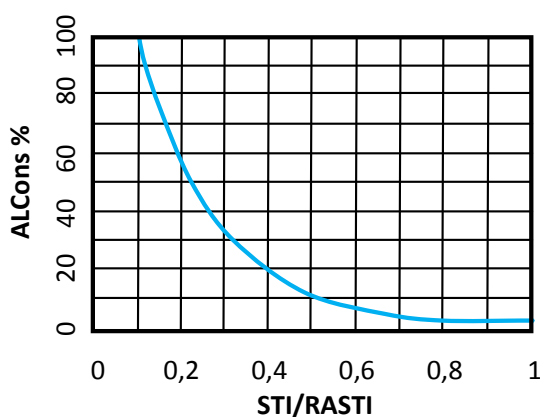


Figura 27. Correlación entre STI / RASTI y ALCons [16].





3.7.2 Pérdida de Articulación de Consonantes

La inteligibilidad de la palabra se relaciona con la capacidad de comprender correctamente las consonantes por llevar la mayor parte de la información del mensaje hablado. A raíz de este concepto surge el índice ALCons (*Articulation Loss of Consonants*) como medida de la inteligibilidad de las salas.

Este parámetro relaciona el tanto por ciento de consonantes no entendidas correctamente por un oyente en un recinto con reverberación y ruido, con el total de consonantes emitidas. De este modo, cuanto mayor sea el valor del ALCons, menor será la inteligibilidad de la palabra, viéndose reflejada esta valoración en la siguiente tabla.

ALCons %	Valoración
0 % - 3 %	Excelente
3 % - 7 %	Muy buena
7 % - 12 %	Buena
12 % - 15 %	Regular
15 % - 18 %	Pobre
> 18 %	Inaceptable

Tabla 4. Tabla de valoración de la Pérdida de Articulación de Consonantes.

Finalmente, mediante la gráfica presente en la siguiente figura se pueden apreciar los experimentos de Peutz que sirven para calcular ALCons de una forma más rápida en función del tiempo de reverberación y el ruido de fondo [4].

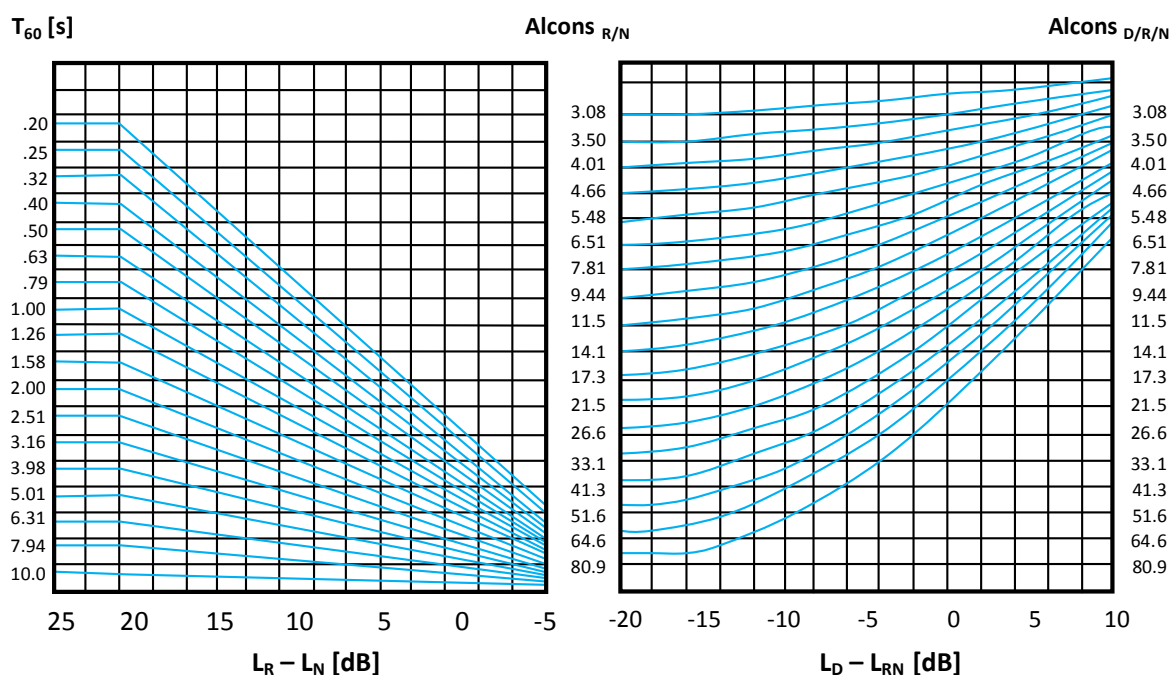


Figura 28. Determinación de ALCons [4].



3.8 Ruido de fondo

Es todo aquel ruido presente en una sala cuando no se realiza ninguna actividad, puede provenir del exterior del recinto o tener su origen en los sistemas de climatización y en las instalaciones eléctricas, siendo un parámetro decisivo para determinar la calidad acústica de una sala.

3.8.1 Curvas NC

Uno de los métodos para evaluar objetivamente el grado de molestia que produce un determinado ruido de fondo se basa en comparar los niveles de ruido existentes en la sala con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (*Noise Criteria*).

Se trata de un índice proporcionado por Beranek, que relaciona el espectro de un ruido con la alteración que produce en la comunicación verbal, teniendo en cuenta los niveles de interferencia de la palabra y los niveles de sonoridad.

Las curvas NC siguen la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia y se utilizan para determinar el nivel de ruido máximo recomendado dependiendo de la funcionalidad de la sala.

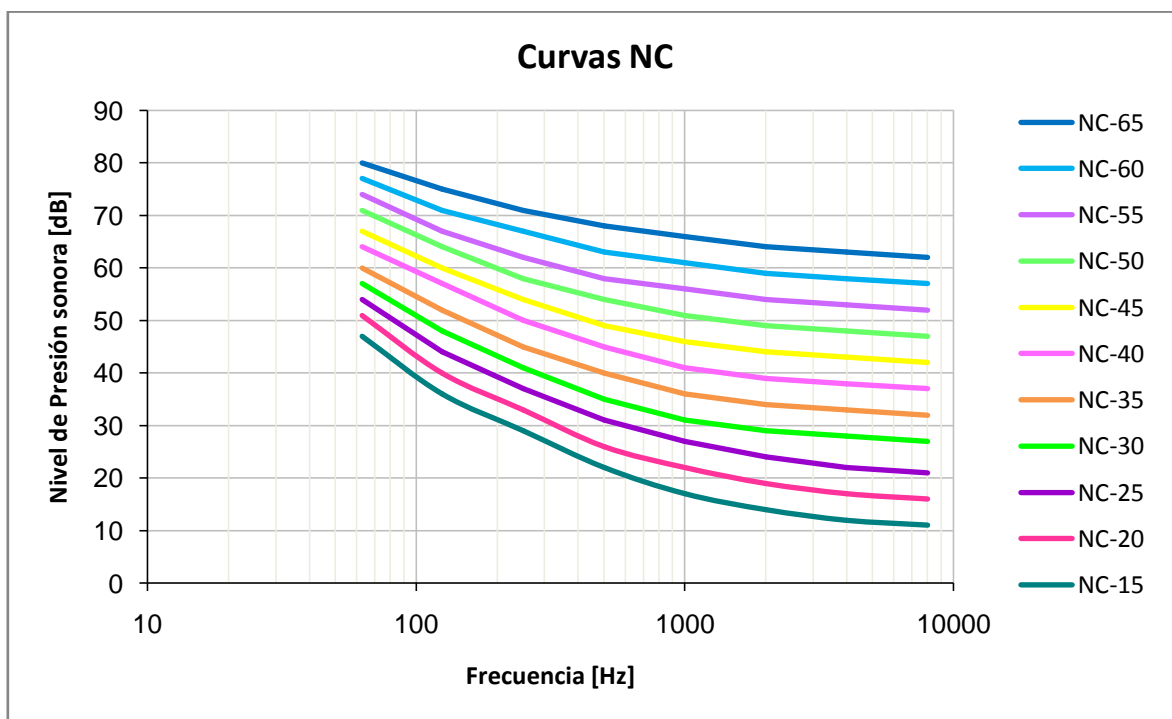


Figura 29. Curvas NC.

Un recinto cumplirá una determinada curva NC si sus niveles de ruido de fondo se encuentran por debajo de la curva NC correspondiente en todas las bandas de octava para conseguir un confort acústico y un grado de inteligibilidad adecuado [4].



Tipo de sala	Curva NC recomendada
Auditorios	NC 15 – 20
Salas de conciertos y teatros	NC 15 – 25
Salas de conferencia / aulas	NC 20 – 30
Despachos de oficinas / bibliotecas	NC 30 – 35
Restaurantes	NC 35 – 40
Polideportivos	NC 40 – 50

Tabla 5. Curvas NC recomendadas en función del tipo de sala.

3.8.2 Curvas RC

Otro de los métodos utilizados para la valoración del ruido en un recinto son las curvas RC (*Room Criteria*), elaboradas por Blazier sirven como base psicoacústica para el diseño de una familia de curvas principalmente caracterizadas por tener una pendiente media de aproximadamente 5 dB / octava sobre un amplio rango de frecuencia, siendo su rango de aplicación desde la curva RC-15 a RC-50.

Las curvas RC poseen mejoras respecto de las NC en la forma y nivel del espectro, aportando datos desde la banda de 16 Hz hasta 31,5 Hz y analiza vibraciones perceptibles pertenecientes a energía acústica de baja frecuencia.

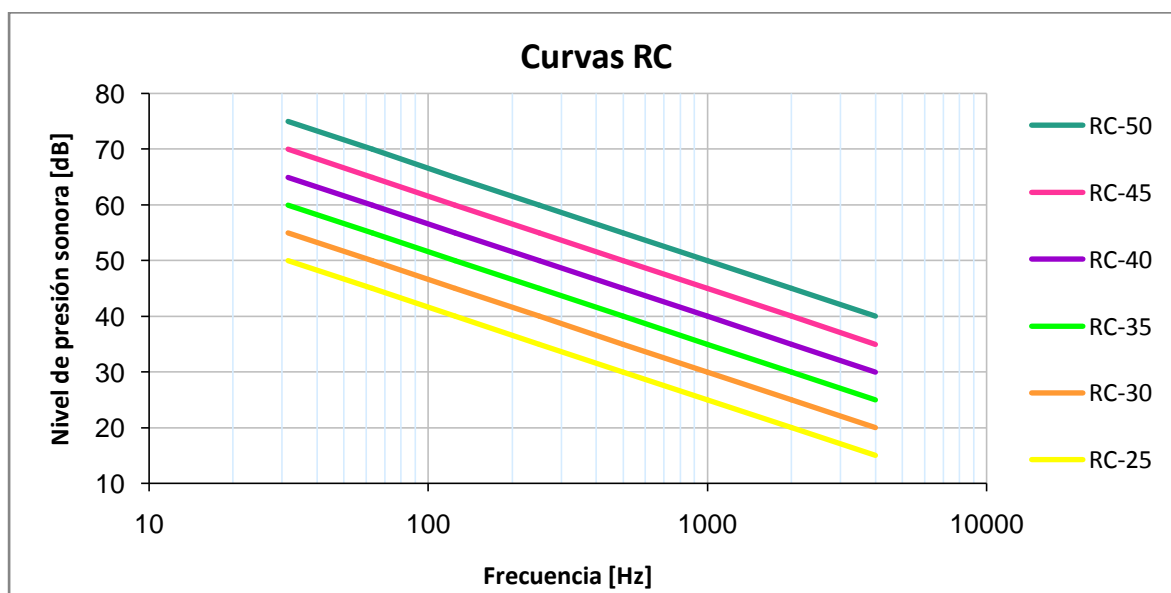


Figura 30. Curvas RC.

Posteriormente, en el Capítulo V correspondiente a la descripción experimental del proyecto, se definirán los criterios de valoración de ruido mediante curvas RC definiendo su cálculo y caracterizando finalmente las molestas ocasionadas por el ruido como sensaciones de retumbo (R), siseo (H), tonalidad (T) y neutralidad (N), en función del espectro resultante.



Tipo de sala	Curva NC recomendada
Auditorios	RC – 20
Teatros	RC – 25
Salas de conferencia / aulas	RC – 30
Restaurantes	RC – 45

Tabla 6. Rangos recomendados de curvas RC para diversas salas.

Además de las ventajas que poseen este tipo de curvas para el análisis del ruido de fondo como la sencillez y su severidad tanto en baja como en alta frecuencia, cabe destacar el inconveniente de que su estudio únicamente puede ser realizado en sala vacía [14].

3.8.3 Curvas NCB

Otro de los criterios utilizados para el análisis del ruido de fondo en recintos es su seguimiento mediante las curvas NCB (*Balanced Noise Criterion Curves*) que determinan la aceptabilidad de la comunicación de la palabra.

Creadas por Beranek y gracias a su revisión, estas curvas suponen mejoras respecto del análisis realizado mediante curvas NC y RC ya que su diseño se centra en el estudio de espacios interiores ocupados. Las curvas NCB establecen niveles de presión sonora referenciales en frecuencias de banda de octava para el ruido de fondo de forma que se pueda clasificar como siseante o retumbante.

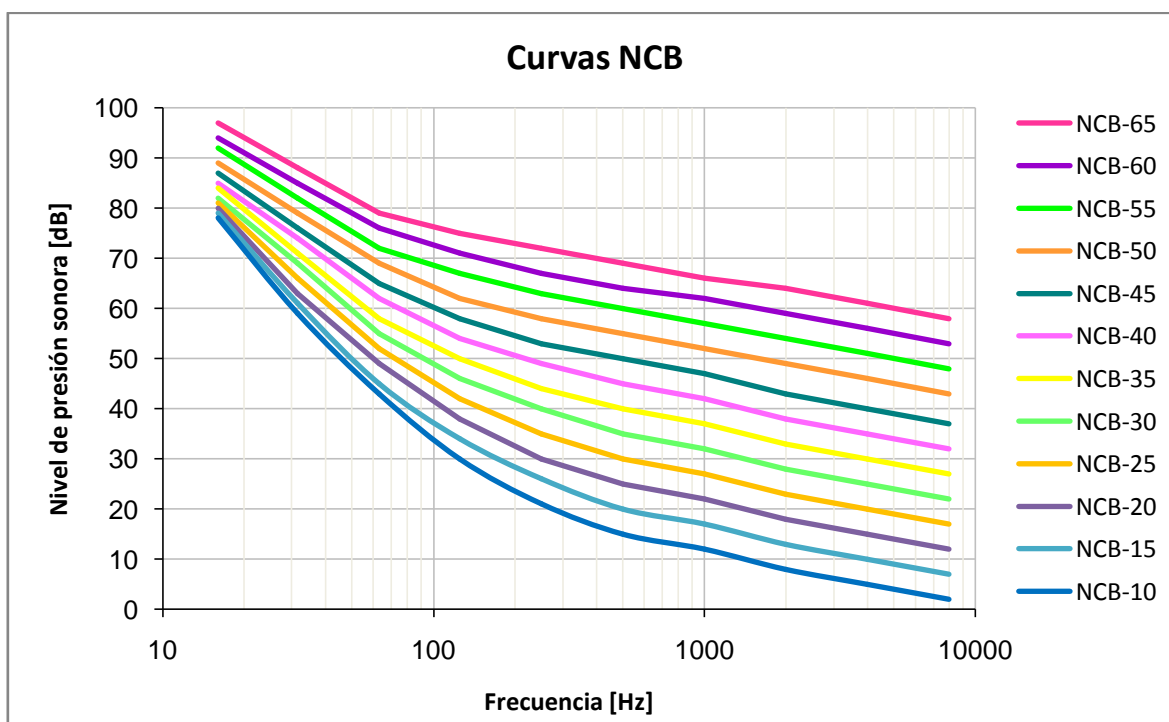


Figura 31. Curvas NCB.





Posteriormente, en el Capítulo V correspondiente a la descripción experimental de este proyecto, se definirán los criterios de valoración de ruido mediante curvas NCB definiendo su cálculo y caracterizando finalmente las molestas ocasionadas por el ruido como sensaciones de retumbo y siseo.

A continuación se muestran los rangos de curvas NCB aceptables en función de la tipología del recinto según Beranek.

Tipo de sala	Curva NCB recomendada
Grandes auditorios y teatros	< NCB – 20
Pequeños auditorios y teatros	< NCB – 30
Salas de conferencia / aulas	NCB 30 – 40
Salas de conciertos / salas recitales	NCB 10 – 15

Tabla 7. Rangos recomendados de curvas NCB en diversas salas [15].

3.9 Criterios de diseño

A la hora de diseñar un recinto tanto destinado al uso de la palabra como para una emisión de tipo musical, existen una serie de requerimientos recomendados para alcanzar las características acústicas óptimas, siguiendo las pautas que se definen a continuación.

3.9.1 Dimensionado

Los criterios de dimensionado de un recinto se clasifican en función del uso al que se destina, en este caso se diferencia entre los usos principales a los que se destina el teatro objeto de estudio, la emisión de voz y música.

I. Criterios recintos destinados a la palabra

La relación capacidad-volumen definida en este caso equivale a dimensiones situadas entre 4 m^3 hasta 6 m^3 por persona.

Las condiciones acústicas óptimas para grandes teatros de prosenio llevan a dimensiones capaces de albergar 1000 localidades aproximadamente, situando el parámetro T_{mid} entre 1,1 s y 1,2 s. Sin embargo, para teatros más pequeños con capacidad de hasta 500 localidades el T_{mid} requerido puede tomar un valor cercano a 1 s.

II. Criterios en recintos destinados a música

En el caso de grandes salas de conciertos, el volumen suele situarse en torno a 20.000 m^3 con una capacidad de hasta 2300 localidades, siendo la relación capacidad-volumen en caso de que la emisión sea musical situada en torno a 10 m^3 por persona.



3.9.2 Escenario

El diseño de un escenario es crucial para una buena conjunción, equilibrio y balance de la orquesta, sin embargo las características pueden variar en función de la interpretación de cada autor.

Según Beranek, una orquesta requiere aproximadamente de un área que oscila entre 150 m^2 y 190 m^2 albergando espacio para solistas, siendo la proposición de algunos autores $0,5 \text{ m}^2$ por persona que ocupe el escenario. En términos generales, se recomienda para una orquesta sinfónica en disposición rectangular dimensiones de 17 m de anchura y 11 m de profundidad de escenario.

Las paredes del escenario deben diseñarse de forma que aporten energía a los propios músicos, buscando la correcta inclinación, incluso en salas de uso polivalente con caja escénica preparada para actuaciones teatrales, debería colocarse una concha acústica en el escenario cuando una sala se utiliza para representaciones musicales.

3.9.3 Anfiteatros

Los criterios de dimensionado de anfiteatros o balcones de un recinto se clasifican en función del uso al que se destina, en este caso se diferencia entre los usos principales a los que se destina el teatro objeto de estudio, la emisión de voz y música.

I. Criterios en recintos destinados a la palabra

El balcón o anfiteatro crea una zona de reverberación más reducida, lo que se traduce en un dato bueno para la inteligibilidad.

En teatros este efecto no genera casos críticos, sin embargo puede presentar problemas a la hora de representar un concierto, por ello debe tenerse en cuenta la altura de la boca del balcón y su profundidad.

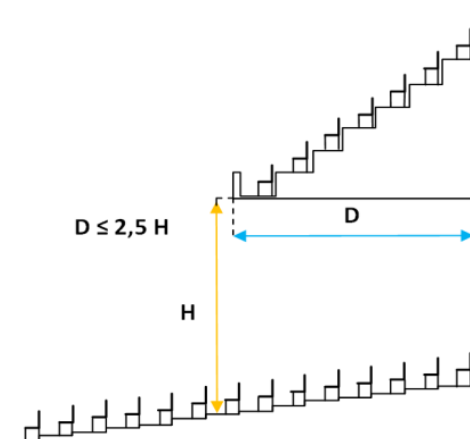


Figura 32. Dimensionado de anfiteatros en recintos destinados a la palabra [16].





II. Criterios en recintos destinados a música

Para salas de conciertos, los balcones no pueden ser muy profundos, porque reducirían la reverberación al público situado en el fondo de éste. Para ello, la recomendación se basa en el criterio fijado en la figura 32 pero de forma que $D \leq H$.

3.9.4 Direccionamiento de las primeras reflexiones

El diseño de la sala en función de sus dimensiones se estudia para cada una de sus superficies, analizando techos y paredes laterales de sala ya que están sujetas a modificaciones para conseguir las características acústicas deseadas.

Para el diseño del techo de la sala se tiene en cuenta la representación de la siguiente figura para hacerse una idea aproximada de la situación de difusores a utilizar, mediante la cual deben generarse el máximo número de reflexiones en la zona posterior del recinto, donde el sonido directo es más débil, de forma que se cumpla la condición de campo difuso.

Las paredes laterales de un recinto acústico pueden aprovecharse para dar reflexiones laterales, aunque en el caso de los teatros no es tan imprescindible, para música la sensación de espacialidad dada por las reflexiones laterales es de esencial importancia.

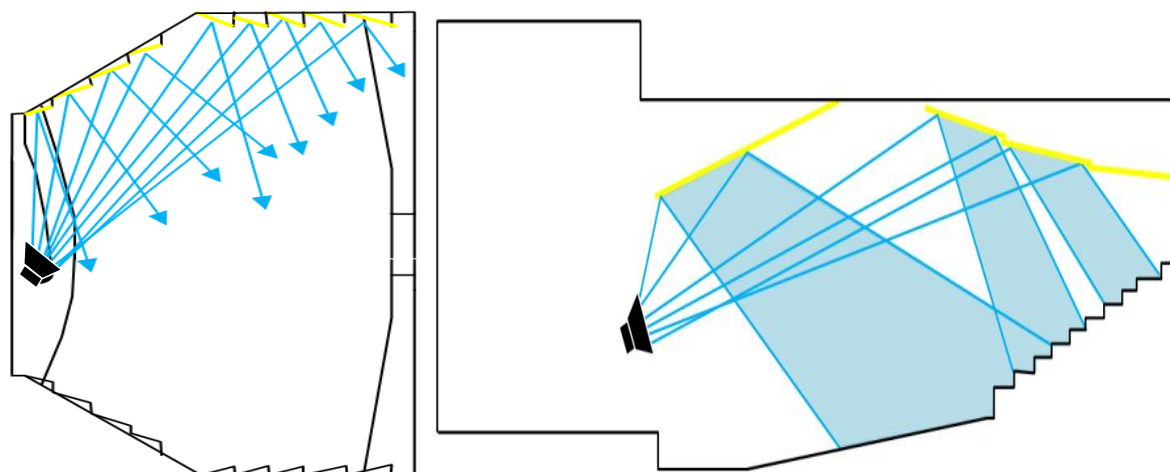


Figura 33. Recomendación de diseño para techos y paredes laterales.

La distancia máxima recomendada dependerá del ángulo entre orador y receptor. Para posiciones en el eje frontal, la distancia máxima puede variar entre 20 y 45 m en función de la energía que llega al receptor procedente de las primeras reflexiones. Para posiciones menos favorecidas, laterales o casi posteriores, las distancias se reducen, con máximos de 20 o 30 m, en casos de tener una relación energética buena [16].

CAPÍTULO IV



ESTADO DEL ARTE



4. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se expone la evolución histórica sobre la necesidad de realizar estudios acústicos en recintos además de exponer una colección de salas emblemáticas cuyos usos y características tanto acústicas como arquitectónicas son similares a las del auditorio Tomás y Valiente de Fuenlabrada.

4.1 Evolución histórica

El inicio de un análisis histórico de acústica arquitectónica se sitúa en el mundo teatral de la antigua Grecia, en la que los teatros se ubicaban en las laderas de las colinas permitiendo una buena visión de la escena, además de reducir el ruido de fondo. Uno de los aspectos más destacados fue la pared de fondo sobre la cávea, que además de disminuir la inmisión de ruidos exteriores, hacía que el sonido procedente de los actores se dirigiese hacia el público.

Durante la etapa del Medievo el espacio teatral tenía lugar en las plazas públicas, por lo que las preocupaciones acústicas en esa época prácticamente desaparecieron.

En la época del Renacimiento las representaciones experimentaron el tránsito desde recintos abiertos a cerrados, apareciendo los fenómenos de reverberación y produciéndose una acentuada reducción de dimensiones que provocó una mejor localización del sonido.

Es en el Barroco cuando surge una clara separación entre la escena y el área destinada a la música. Además, los teatros se hicieron más largos que anchos mejorándose las reflexiones laterales en la sala y generando inconvenientes en el fondo de la misma.

Durante el Neoclasicismo se construyeron alguno de los teatros más importantes del momento, como el Teatro de la Scala de Milán, cuya fama ayudaba a tolerar ciertas deficiencias prácticas producidas por las condiciones acústicas de los palcos, beneficiando esta disposición a los espectadores del patio de butacas.

En el siglo XIX las salas de conciertos llegaron a ser más grandes y consecuentemente más reverberantes. Para conservar la alta definición con los tonos más detallados debían ser suficientemente estrechas para la obtención de fuertes reflexiones laterales. Fue en esta época cuando se aceptó disponer los asientos en anfiteatros.

4.2 Situación actual

Aunque los primeros estudios científicos tuvieron su origen en los siglos XVI y XVIII, la ausencia de criterios científicos que determinasen la calidad acústica de los espacios arquitectónicos hacía que los proyectos de salas de conciertos y espectáculos se basasen en aproximaciones, tanteos y pura intuición.





Fue durante los últimos años del siglo XIX y principios del siglo XX cuando acontecieron los primeros grandes avances que dieron lugar a la Acústica Arquitectónica que se conoce hoy en día. El principal exponente de esta ciencia fue W. C. Sabine cuyos resultados pudieron ser aplicados en el diseño de la sala del Symphony Hall de Boston obteniéndose unos resultados excelentes.

Actualmente las construcciones teatrales recuperan de nuevo un papel esencial en la arquitectura, y a gran escala en el campo de la rehabilitación arquitectónica. Razón por la que es interesante profundizar en una cualidad que es determinante en la realización de la función para la que este tipo de edificios fueron construidos, su acústica.

4.3 Auditorio Kursaal de San Sebastián

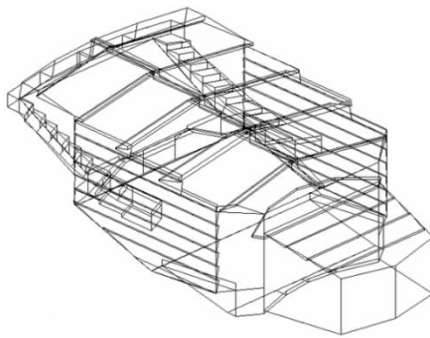
El auditorio Kursaal ha sido seleccionado por la similitud de usos a los que se destina, como son la realización de representaciones teatrales y de ópera, así como congresos y reuniones de gran formato, por lo que se puede clasificar como espacio polivalente.

El recinto se caracteriza por ser un teatro con posibilidad de ofrecer ópera, aunque las posibilidades que posee para ofrecer grandes montajes de este tipo son muy limitadas, puede acoger representaciones de complejidad media.



Figura 34. Auditorio Kursaal, San Sebastián [17].

Para representaciones operísticas posee un foso, así como un sistema de telones laterales que permiten modificar las características acústicas de la sala. Además, con un volumen de 17530 m^3 y una superficie de 1533 m^2 alberga capacidad para 1800 espectadores.



Parámetros	Valor
T_{mid}	1,87 s
EDT_{medio}	2,17 s
C_{80}	2 dB
BR	1,15
LF	> 0,2
ITDG	21 ms
G_{mid}	6,4 dB

Figura 35. Modelo acústico y parámetros del Auditorio Kursaal.

Las posibilidades de que suene mejor se incrementan en un edificio concebido específicamente para escuchar música. El riesgo de hacer un auditorio polivalente es la inversión para las artes escénicas dando lugar a que sea un auditorio convertido en teatro.

Los inconvenientes acústicos que genera destinar una sala para un uso polivalente ayuda a comprender la acústica del teatro Tomás y Valiente, y planteará soluciones destinadas a la subsanación de este tipo de problemas tras el estudio de sus características.

4.4 Auditorio ciudad de León

El Auditorio Ciudad de León es una sala destinada principalmente al desarrollo de conciertos, espectáculos y representaciones de danza y teatro, además de emisiones cinematográficas, así como actividades culturales, tales como conferencias o exposiciones, pudiendo destinarse a otro tipo de actividades distintas a las señaladas.



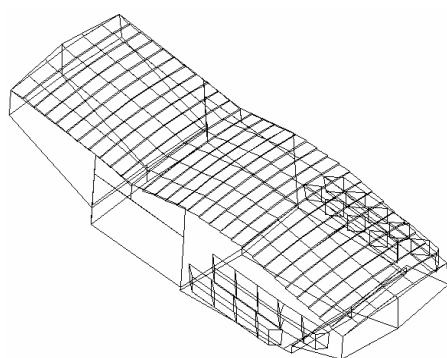
Figura 36. Auditorio Ciudad de León [17].



Este auditorio establece una especial similitud arquitectónica con el teatro Tomás y Valiente debido a la presencia de palcos laterales y un acondicionamiento acústico basado en la presencia de paneles de madera, sin embargo carece de superficies absorbentes excepto por la presencia del patio de butacas.

Con un volumen total de 10.030 m^3 , tiene un aforo variable entre 600 y 1200 localidades debido a la presencia de una sala principal y otra posterior frente a los 9427 m^3 y 810 localidades que ofrece el Teatro Tomás y Valiente, por lo que la desviación entre parámetros se debe a un factor de diferencia de dimensiones.

Ante la polivalencia de usos a los que se destina el recinto, el Auditorio Ciudad de León ofrece distintas posibilidades ante una configuración sinfónica y para representaciones teatrales.



Configuración	T_{mid}	Volumen	Aforo
Total	1,66 s	10030 m^3	1130
Sinfónica	1,80 s	$7890,49 \text{ m}^3$	740
Teatro	1,29 s	$5931,56 \text{ m}^3$	740

Figura 37. Modelo acústico y parámetros del Auditorio Ciudad de León.

Ante los parámetros expuestos en la figura 37, el que más se aproxima al T_{mid} medido en el Teatro Tomás y Valiente es la configuración para teatro a diferencia de no poseer grandes superficies absorbentes de no ser por la zona de butacas. Sin embargo, el Auditorio Ciudad de León es uno de los ejemplos a seguir como figura de sala polivalente, ya que adapta sus características arquitectónicas en función del uso al que se destine el recinto.

CAPÍTULO V



DESCRIPCIÓN DEL TEATRO TOMÁS Y VALIENTE



5. DESCRIPCIÓN DEL TEATRO TOMÁS Y VALIENTE

En este capítulo se pretende obtener una idea clara de la situación, geometría y uso del teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada.

El Centro Cultural Tomás y Valiente acoge en su interior uno de los mayores espacios públicos dedicados a la zona sur de la Comunidad de Madrid, el teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada, un municipio situado a 18 km de la capital.

5.1 Alcance

El emblemático edificio, diseñado por el arquitecto español Andrés Perea, fue inaugurado en julio de 2005, tras la finalización de la construcción del teatro-auditorio comenzada en junio de 2004, a partir de un presupuesto total de 1,7 millones de €. Su emplazamiento se encuentra cercano a la estación de cercanías de La Serna del municipio, concretamente en el cruce de la avenida de España con la calle Leganés.

Además del teatro-auditorio, el gran edificio del Centro Cultural Tomás y Valiente alberga capacidad para acoger un el conservatorio de la escuela de música Dionisio Aguado, la Biblioteca Pública Tomás y Valiente, salas de exposiciones de arte CEART y la Concejalía de Cultura del municipio. Los objetivos del conjunto del edificio se destinan hacia el deseo de convertir el centro en un generador de actividad de carácter comercial y lúdico.

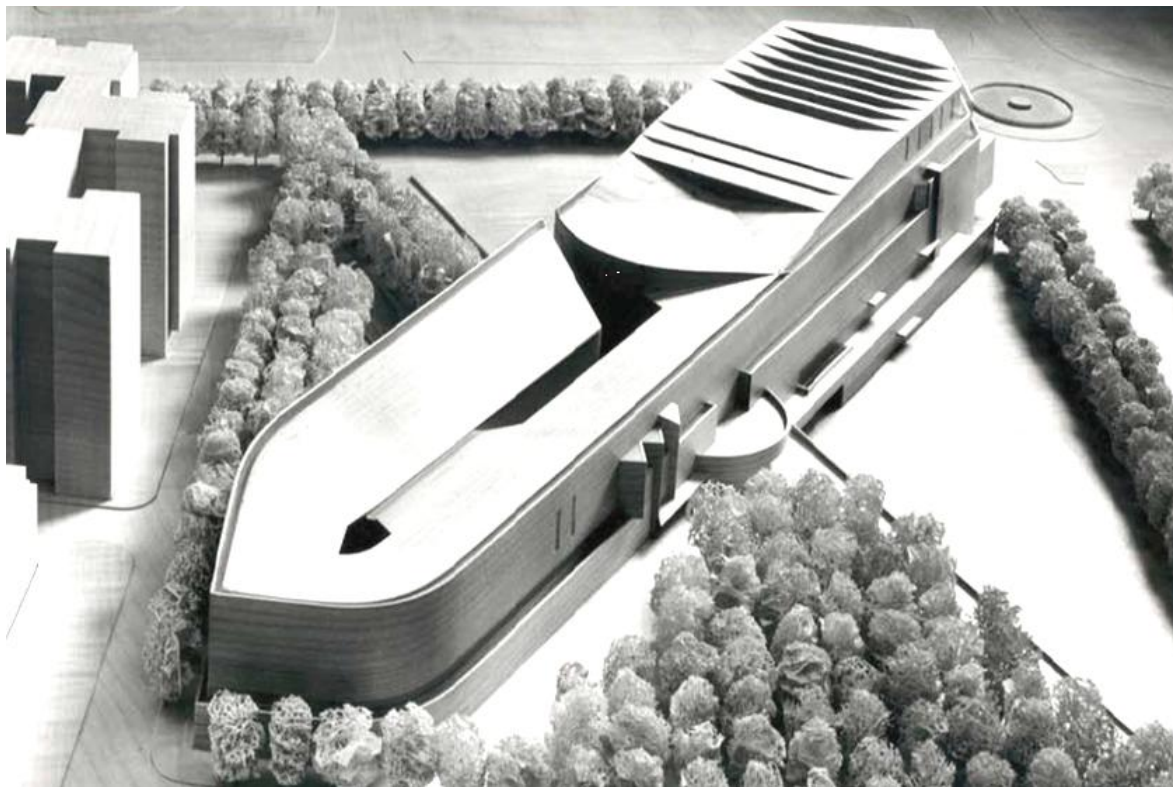


Figura 38. Maqueta del diseño del Centro Cultural Tomás y Valiente.



5.2 Entorno

En lo referente al entorno acústico, el edificio en su exterior ocupa las dimensiones de una manzana, rodeado por una plaza que se destina para el uso de establecimientos comerciales situados en la planta baja, y eventualmente para actividades culturales.

El suelo urbano que presenta la zona de ubicación se destina para un uso mayoritario residencial, en el que el medio ambiente sonoro es producto del tráfico rodado generado por vehículos de paso, con una intensidad horaria mayor durante el periodo diurno debido al tipo de vías que rodean el edificio y su emplazamiento, siendo menor en horario nocturno, fines de semana, festivos y el mes de Agosto.

La distancia mínima entre la infraestructura ferroviaria del municipio y el Centro Cultural es de 300 m. La lejanía y la velocidad reducida de circulación por ser tramo urbano aseguran que el tráfico ferroviario no contribuye al medio ambiente sonoro de la zona.



Figura 39. Mapa de ubicación del Centro Cultural Tomás y Valiente en Fuenlabrada.

5.3 Estructura

Atendiendo a la descripción del teatro-auditorio, con un volumen de 9427 m^3 , el teatro Tomás y Valiente tiene capacidad para albergar 810 localidades dispuestas de manera escalonada en un amplio patio de butacas que se extiende desde la primera fila frente al escenario hasta la cabina técnica que se encuentra en la parte superior de la sala.



En el interior del teatro-auditorio la distribución de butacas pares se encuentra numerada desde la parte central hacia la izquierda, y hacia la derecha las impares.

Adicionalmente el teatro posee 6 palcos laterales simétricos a los que se accede desde las filas 8, 16 y 23 por el interior del teatro, que se corresponden con la primera, segunda y tercera planta respectivamente para su acceso desde el exterior.

El escenario, que ocupa 280 m^2 , tiene una boca de 16 m de ancho y 8,93 m de altura, siendo su profundidad de 12,5 m. Además, debajo del mismo se encuentra un foso reservado para almacenar el equipamiento necesario para las actuaciones.



Figura 40. Vista exterior del teatro Tomás y Valiente.

5.4 Características

El alcance del teatro dispone de un equipamiento escénico que dispone de estructuras de apoyo (peine, galerías, embocadura, pavimentos, cerramientos, etc) y maquinaria escénica compuesta por 30 barras contrapesadas, 11 barras monitorizadas de velocidad fija, motores puntuales, sistema de control, montacargas y tarimas.

La iluminación escénica dispone de un control con 192 canales de regulación, sistema de luz de sala, equipo de distribución y proyectores, además de poseer un sistema de comunicación por megafonía. Adicionalmente el sistema de reproducción de sonido se caracteriza por los sistemas de transducción electroacústica emisores y receptores.





Analizando el diseño acústico de teatro destacan el uso de dispositivos acústicos difusores de madera y superficies con mayor absorción (cortinas del escenario, butacas tapizadas, revestimiento de paredes).



Figura 41. Interior del Teatro Tomás y Valiente.

Actualmente, el teatro-auditorio del Centro Cultural Tomás y Valiente de Fuenlabrada es un recinto destinado principalmente a la realización de representaciones teatrales, por lo que consecuentemente es un recinto destinado a la reproducción de la palabra y música.

Además de teatro, el recinto se emplea como sala polivalente, destacando entre otros de sus eventos conciertos y conferencias, así como actuaciones de danza y diversos actos relacionados con el arte y la cultura.

CAPÍTULO VI

DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL



6. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

Para poder llevar a cabo el estudio de los parámetros acústicos que caracterizan el Teatro Tomás y Valiente, en primer lugar es necesario realizar una serie de medidas acústicas experimentales *in situ*.

Estas medidas corresponden al apartado práctico que aborda el proyecto, de forma que a partir de ellas se puedan obtener resultados comparables respecto de los obtenidos en el modelo acústico diseñado mediante el programa de simulación arquitectónica y electroacústica EASE, al cual se hace referencia en el Capítulo VII, y pudiendo definir el comportamiento acústico de la sala a partir de su estudio.

6.1 Medida del Tiempo de Reverberación

Se define como uno de los parámetros fundamentales que describen la acústica de una sala, ya que gracias a él se pueden determinar los usos a los que se puede destinar el recinto. Es el tiempo que transcurre desde que la fuente cesa la emisión sonora hasta que el nivel de presión acústica decae 60 dB.

La razón principal por la que se mide el tiempo de reverberación es porque es el parámetro que mejor representa las características acústicas de una sala.

6.1.1 Condiciones de medida

Para la realización de los ensayos de determinación del tiempo de reverberación en el teatro se ha seguido el procedimiento descrito según la norma UNE-EN ISO 3382:2008⁷, aplicable a recintos tales como auditorios, así como salas destinadas a la palabra y música.

Bajo la aplicación de la norma, las condiciones consisten en la realización de la medida en un recinto desalojado y cerrado, con el telón recogido y con el foso que existe debajo del escenario cerrado.

Aunque la importancia de la contribución del aire es bastante baja para el ensayo, para establecer la precisión se mide la temperatura y se establece la humedad relativa, siendo de 13°C y 35 % respectivamente, de forma que estos datos afectarán de cara al futuro en el cálculo de resultados obtenidos mediante la simulación con modelo informático de la sala diseñado.

Con la finalidad de obtener una mayor precisión de la medida se establecen dos posiciones de emisión para la fuente en el escenario, situada a 1,5 m del suelo, y se elige un número de posiciones de medida en las zonas de audiencia con la finalidad de dar una cobertura

⁷ UNE-EN ISO 3382:2008. *Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos*. Estándar que especifica métodos de medida para el tiempo de reverberación a recintos, material necesario, y método de evaluación y presentación de los resultados obtenidos.





normal al recinto ya que los materiales se encuentran distribuidos uniformemente por la sala y consecuentemente sus coeficientes de absorción y difusión.

Resultan finalmente 12 puntos de medida en los cuales el micrófono se ha de situar a una altura de 1,2 m del suelo, ya que es la altura estimada a la que se encuentra la cabeza de un oyente sentado, cumpliéndose para cada uno las condiciones especificadas en la norma.

La distancia desde cada posición de micrófono a la superficie reflectante más cercana debe ser al menos $\frac{1}{4}$ de longitud de onda y separados entre ellos una distancia superior a 2 m, evitando posiciones simétricas. Además, han de estar separados de la fuente emisora una distancia mayor de 2,5 m para evitar una influencia excesiva del sonido directo.

A continuación se muestran una serie de datos en los cuales se reflejan las posiciones de la fuente emisora en el escenario, los puntos de medida en las zonas de audiencia y su posterior representación sobre el modelo arquitectónico.

Donde el origen de coordenadas se encuentra 1,2 m debajo de la parte central del escenario y a la altura del telón como se aprecia en la figura 42.

Puntos de emisión	Coordenadas		
	x	y	z
F ₁	-3,10	-3,64	2,70
F ₂	3,00	-1,88	2,70

Tabla 8. Posiciones de los dos puntos de emisión de la fuente.

Punto de medida	Coordenadas			Posición	
	x	y	z	fila	butaca
1	-6,38	3,82	2,13	2	29
2	-1,00	6,02	3,03	4	2
3	10,75	5,00	5,00	8	palco derecha 3
4	-4,67	10,94	5,00	8	18
5	5,20	13,00	5,90	10	23
6	0,00	15,23	6,82	12	1
7	-10,75	19,00	8,82	16	palco izquierda 2
8	6,00	20,10	8,80	16	27
9	-4,00	24,53	10,82	20	12
10	-5,00	28,80	13,07	24	4
11	2,55	28,24	12,57	23	5
12	10,75	18,00	12,57	23	palco derecha 3

Tabla 9. Posiciones de los puntos de medida en las zonas de audiencia.

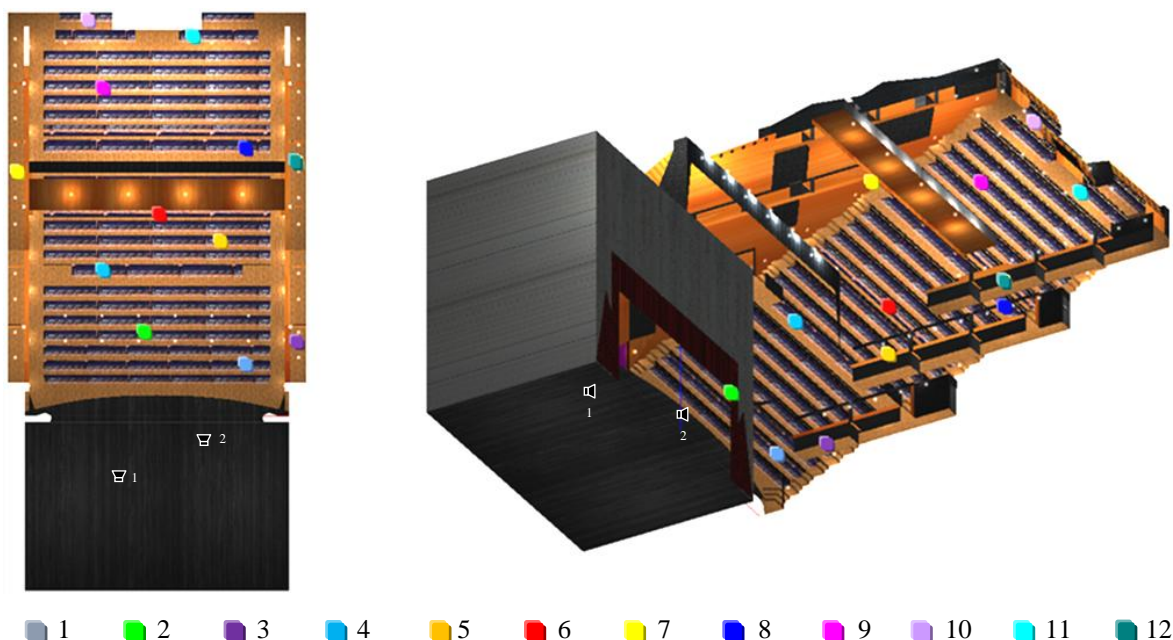


Figura 42. Posiciones de la fuente emisora y los puntos de medida.

6.1.2 Equipamiento y conexionado

Una vez establecidas las condiciones para la realización de las medidas *in situ* según el procedimiento, es necesario describir el equipamiento que se precisa para realizarlas, el conexionado y la configuración del mismo.

Para la adquisición de datos de las medidas realizadas se emplea un sistema de medida de ruido y vibraciones externo denominado *Symphonie* desarrollado por *01dB*. Consiste en transductores conectados a una pequeña unidad de adquisición que transfiere datos en tiempo real a un ordenador portátil mediante un interface CaCard (PCMCIA).

El paquete de software empleado se denomina *dBbati32*, el módulo de acústica en edificios mediante el cual se realiza el estudio completo de las medidas del tiempo de reverberación y espectros. Los transductores electroacústicos empleados consisten en una fuente dodecaédrica onmidireccional *DO12* y un micrófono *G.R.A.S.* conformado por un preamplificador del tipo 26AK y una cápsula de micrófono prepolarizada.

Además, se precisa el uso de un amplificador de potencia *M700* para amplificar las señales que genera el sistema, ya que la fuente debe ser capaz de producir un nivel de presión acústica suficiente para garantizar una curva de decrecimiento que comience al menos 35 dB por encima del ruido de fondo en la banda de frecuencias correspondiente. Finalmente se precisa de un calibrador *Cal01* de *01dB* para comprobar la sensibilidad del micrófono previa a la medida.

A continuación se muestra un esquema y la descripción del conexionado de los equipos empleados en el ensayo.





Figura 43. Esquema de conexionado para la medida del tiempo de reverberación.

Recorriendo el conexionado de la figura 43 de derecha a izquierda. En primer lugar, el ordenador y el sistema de adquisición de datos *Symphonie* se comunican mediante una tarjeta PCMCIA, representado como la conexión en color negro. En una de las dos entradas que posee *Symphonie* se conecta el micrófono mediante un cable con conectores LEMO de 7 pines para transmitir la señal de entrada de forma que pueda ser procesada por el software *dBbati32*, representado como la conexión gris.

La conexión entre el sistema de medida y el amplificador de potencia *M700* se realiza con un cable con conectores Canon o XLR, conectando la salida de *Symphonie* a la entrada de uno de los dos canales que posee el amplificador de potencia, representado en la figura 43 como la conexión roja.

Finalmente, la conexión representada en color azul es la correspondiente entre una de las salidas del amplificador de potencia y la fuente de emisión omnidireccional *DO12*, mediante un cable con conectores *Speakon*. Otro cableado adicional no representado en la figura es el de alimentación correspondiente al ordenador y el amplificador de potencia.

6.1.3 Método de evaluación y configuración de la medida

El método empleado para la realización de las medidas *in situ* del tiempo de reverberación es el descrito según la norma UNE-EN ISO 3328-2:2008⁸, mediante el procedimiento de medida del tiempo de reverberación por el método de ruido interrumpido.

Este método consiste en la reproducción de una señal en el recinto hasta que alcance un estado estacionario, e interrumpir súbitamente la emisión de dicha señal para registrar el tiempo que tarda en disminuir 60 dB.

Realizado el conexionado de los equipos, es necesaria la configuración del sistema de medida. En primer lugar, se comprueba que las características de los transductores y el calibrador correspondan con los incluidos en la base de datos del sistema. Se activa el canal para asignar el micrófono y se verifica su correcto funcionamiento mediante la calibración de forma que se compruebe que el valor medido es a $94 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$.

⁸ UNE EN ISO 3328-2:2008. *Medición de parámetros acústicos en recintos*. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Capítulo 5.2: Método del ruido interrumpido.



El equipo se calibra en base a la norma IEC 61672-1⁹ de sonómetros, obteniendo la trazabilidad de una magnitud que oscila entre un intervalo de confianza, de forma que se puedan obtener resultados comparables.

Para la configuración de la medida se crea un controlador de gestión de medidas en el que se selecciona el tiempo de reverberación y se especifican los parámetros de emisión de una señal de naturaleza aleatoria de banda ancha (ruido rosa), configurado para bandas de frecuencia de tercio de octava desde 100 Hz hasta 5 kHz, y asignando un tiempo de duración de la medida de 4 segundos para su automatización.

En este caso se configura la medida con un margen dinámico 30 dB, ya que el tiempo de reverberación se puede evaluar basándose en un rango inferior a 60 dB, debido a la dificultad de poder disponer de un rango de evaluación de 60 dB en el ensayo. Esto se debe a que la evaluación subjetiva de la reverberación está relacionada con la primera parte del decrecimiento del sonido, la cual es conveniente para estimar el nivel estacionario en un recinto a partir de su tiempo de reverberación. Además, la relación señal ruido en las mediciones de campo requiere un nivel señal ruido de al menos 35 dB. De esta forma se garantiza que al final de la caída el ruido de fondo se sitúe al menos 10 dB por debajo [18].

6.1.4 Ejecución del proceso y presentación de resultados

Realizada la verificación del sistema de medida y configurado el sistema se comienzan a realizar las medidas, ejecutándose con el software *dBbati32*.

Tras la configuración descrita anteriormente de los parámetros, el sistema se encarga de realizar las medidas de forma automática capturando los datos recogidos por el sistema de adquisición a través del micrófono mientras emite la fuente, y mostrando por pantalla el tiempo de reverberación y las diferentes caídas de nivel de presión sonora a diferentes frecuencias.

El mismo proceso de recogida de medidas se repite en cada uno de los puntos descritos en el apartado 6.1.1, tres veces y para dos posiciones de la fuente en el escenario.

Una vez obtenidos los tiempos de reverberación para cada punto se exportan los resultados, de forma que se pueda obtener el tiempo de reverberación promedio, comprobando que la desviación no sea muy elevada entre ninguna de las bandas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los tiempos de reverberación medidos en cada punto promediado por el número de repeticiones en cada uno, la media global que representan para cada una de las posiciones de la fuente en el escenario (T_{F_1} y T_{F_2}), y su correspondiente desviación estándar (σ_{F_1} y σ_{F_2}).

⁹ IEC 61672-1. *Electroacústica. Sonómetros*. Definición las especificaciones de funcionamiento, criterios ambientales, electrostáticos y de radiofrecuencia, e incertidumbres.





f [Hz]	T _{P1}	T _{P2}	T _{P3}	T _{P4}	T _{P5}	T _{P6}	T _{P7}	T _{P8}	T _{P9}	T _{P10}	T _{P11}	T _{P12}	T _{F1}	σ _{F1}
100	1,14	0,74	0,88	0,54	2,62	0,92	1,64	1,77	1,60	1,41	0,67	0,58	1,21	0,65
125	1,09	2,07	0,95	1,17	2,50	1,64	1,06	1,13	2,56	1,06	1,24	1,49	1,50	0,58
160	1,19	1,75	1,11	2,51	1,69	1,31	1,46	1,36	1,81	1,56	1,11	1,47	1,53	0,39
200	1,32	1,57	1,81	1,30	1,22	0,93	1,50	1,22	0,94	1,14	0,95	2,09	1,33	0,36
250	0,89	1,49	1,38	1,43	1,25	1,71	1,55	1,31	1,32	1,16	2,02	1,55	1,42	0,28
315	1,46	1,14	1,39	1,59	1,32	1,39	1,29	1,23	1,20	1,25	1,10	1,25	1,30	0,14
400	1,35	1,26	1,09	1,39	1,19	1,06	0,97	1,02	1,14	1,17	1,23	1,05	1,16	0,13
500	1,16	1,22	1,09	1,01	0,87	1,15	1,01	0,88	1,10	0,98	0,80	1,24	1,04	0,14
630	1,33	1,24	1,32	1,16	1,17	0,98	1,21	1,00	1,45	1,32	0,82	1,18	1,18	0,18
800	1,07	1,18	1,36	1,04	1,14	0,93	1,06	1,00	1,13	0,85	1,05	0,86	1,06	0,14
1000	1,20	1,07	1,34	1,18	1,10	1,15	0,86	1,28	1,18	1,11	0,97	1,04	1,12	0,13
1250	1,13	1,24	1,23	1,22	1,08	1,20	1,23	1,04	1,29	0,96	0,87	1,14	1,14	0,13
1600	1,05	1,30	1,32	1,40	1,20	1,34	1,01	0,99	1,01	0,96	1,15	1,10	1,15	0,15
2000	1,24	1,22	1,20	1,16	1,24	1,06	1,00	1,06	1,01	0,99	1,07	1,08	1,11	0,10
2500	1,16	1,17	1,19	1,24	1,15	1,06	0,89	1,00	1,07	1,01	0,81	0,87	1,05	0,14
3150	1,02	1,31	1,15	0,90	1,21	0,89	0,95	0,92	0,88	0,75	0,82	0,73	0,96	0,18
4000	1,02	0,97	1,15	0,95	1,08	0,68	0,84	0,75	0,67	0,62	0,64	0,65	0,83	0,19
5000	0,79	0,76	0,76	0,53	0,69	0,56	0,75	0,73	0,61	0,48	0,63	0,79	0,67	0,11

Tabla 10. Promediado de repeticiones de medida en cada punto para la fuente en F₁.

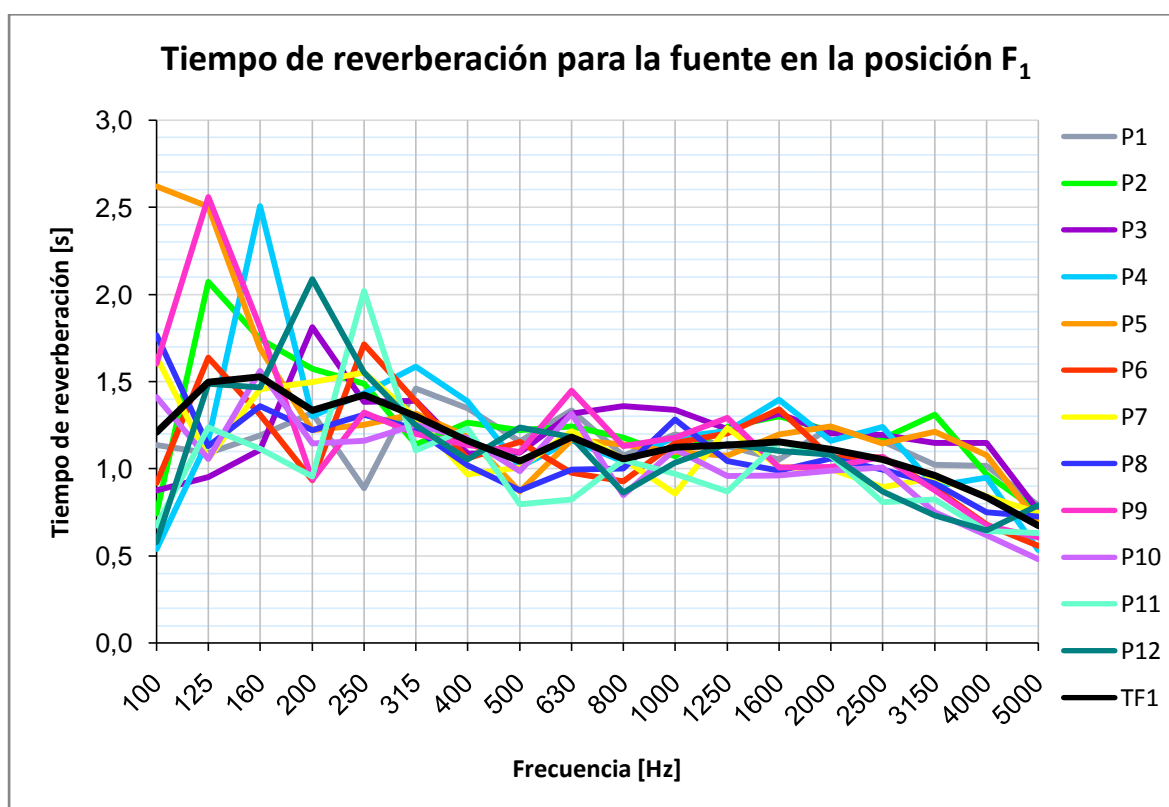


Figura 44. Tiempo de reverberación promedio para la fuente en la posición F₁.



f [Hz]	T _{P1}	T _{P2}	T _{P3}	T _{P4}	T _{P5}	T _{P6}	T _{P7}	T _{P8}	T _{P9}	T _{P10}	T _{P11}	T _{P12}	T _{F2}	σ _{F2}
100	0,88	1,07	0,70	1,47	0,73	1,44	2,19	0,77	1,29	2,29	2,73	1,58	1,43	0,67
125	2,49	2,23	1,60	1,86	1,86	1,94	0,96	1,41	2,04	1,15	1,66	2,54	1,81	0,49
160	1,81	1,51	1,31	1,60	1,12	1,28	0,68	1,89	1,02	2,51	1,62	1,27	1,47	0,47
200	1,83	1,42	1,31	1,68	1,30	1,68	0,97	1,07	1,22	1,40	1,46	1,46	1,40	0,25
250	1,20	1,06	1,26	1,41	1,26	1,39	1,63	1,00	0,89	1,32	0,91	1,15	1,21	0,22
315	1,10	1,37	1,27	1,32	1,19	1,07	1,08	1,06	1,32	1,14	1,31	1,12	1,20	0,12
400	1,10	1,04	1,13	1,06	1,11	0,87	0,97	0,97	1,04	0,99	1,13	1,04	1,04	0,08
500	1,20	1,15	1,15	1,00	0,91	0,95	1,32	0,86	0,80	1,04	0,80	1,28	1,04	0,18
630	1,14	1,04	1,21	1,09	0,84	1,16	0,97	1,11	0,92	0,89	0,79	1,04	1,02	0,13
800	1,16	1,10	1,36	1,07	1,24	1,10	0,98	0,95	1,05	1,11	0,81	1,27	1,10	0,15
1000	1,32	1,30	1,31	1,17	1,24	1,09	1,04	1,07	0,88	0,95	0,93	1,11	1,12	0,15
1250	1,21	1,19	1,39	1,18	1,19	1,10	1,10	1,11	0,94	0,97	1,16	1,06	1,13	0,12
1600	1,25	1,29	1,21	1,27	1,06	1,05	1,11	0,99	0,98	1,04	0,98	1,18	1,12	0,12
2000	1,26	1,24	1,32	1,30	1,12	1,15	1,13	1,09	1,03	0,92	0,95	1,07	1,13	0,13
2500	1,20	1,19	1,25	1,13	1,18	1,07	1,17	1,03	0,96	0,95	0,92	0,95	1,08	0,12
3150	1,06	1,04	1,22	1,14	1,00	0,98	0,97	0,93	0,82	0,88	0,98	0,89	0,99	0,11
4000	0,81	1,14	1,02	1,17	0,92	0,86	0,97	0,85	0,80	0,88	0,80	1,19	0,95	0,15
5000	0,86	0,98	1,04	0,89	0,72	0,71	0,68	0,72	0,70	0,60	0,89	0,78	0,80	0,13

Tabla 11. Promediado de repeticiones de medida en cada punto para la fuente en F₂.

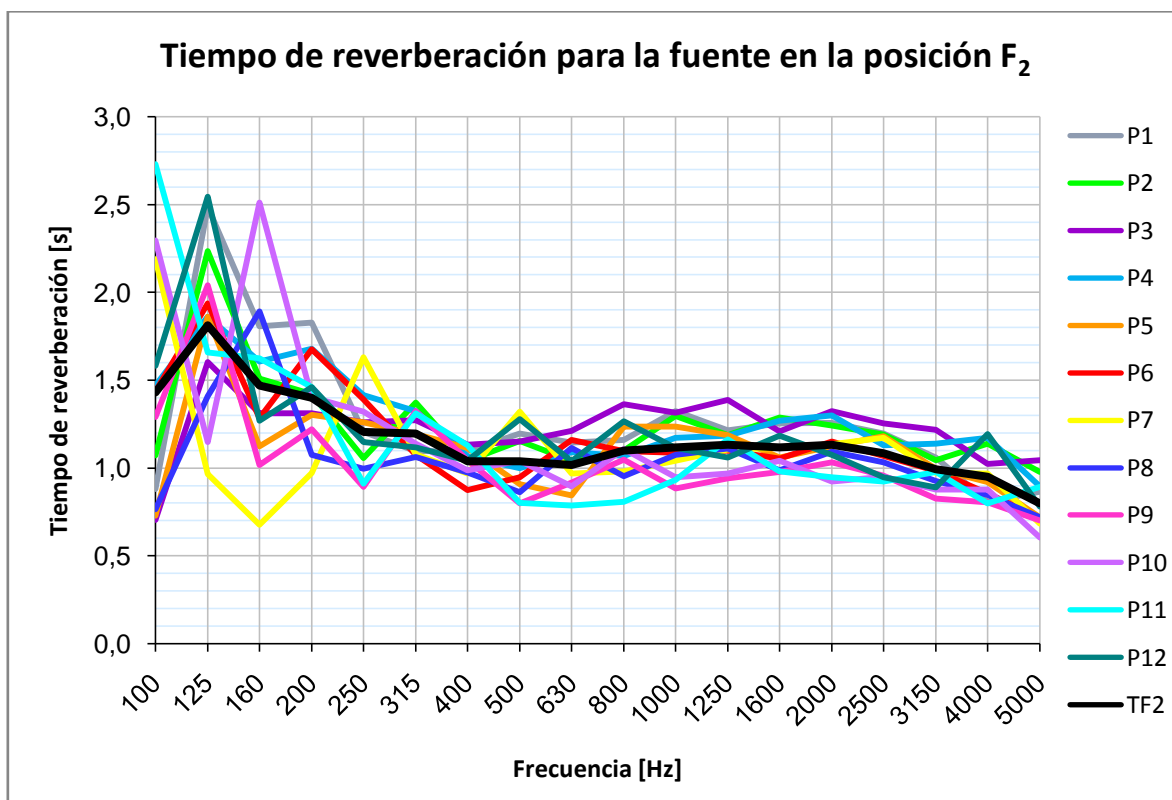


Figura 45. Tiempo de reverberación promedio para la fuente en la posición F₂.





En función de los datos presentados anteriormente en las tablas 10 y 11, se representa en el siguiente gráfico el tiempo de reverberación global (T) resultante del promediado conjunto de los tiempos de reverberación obtenidos para ambas posiciones de la fuente.

f [Hz]	T _{F1}	T _{F2}	T
100	1,21	1,43	1,32
125	1,50	1,81	1,65
160	1,53	1,47	1,50
200	1,33	1,40	1,37
250	1,42	1,21	1,31
315	1,30	1,20	1,25
400	1,16	1,04	1,10
500	1,04	1,04	1,04
630	1,18	1,02	1,10
800	1,06	1,10	1,08
1000	1,12	1,12	1,12
1250	1,14	1,13	1,13
1600	1,15	1,12	1,13
2000	1,11	1,13	1,12
2500	1,05	1,08	1,07
3150	0,96	0,99	0,98
4000	0,83	0,95	0,89
5000	0,67	0,80	0,74

Tabla 12. Tiempo de reverberación global.

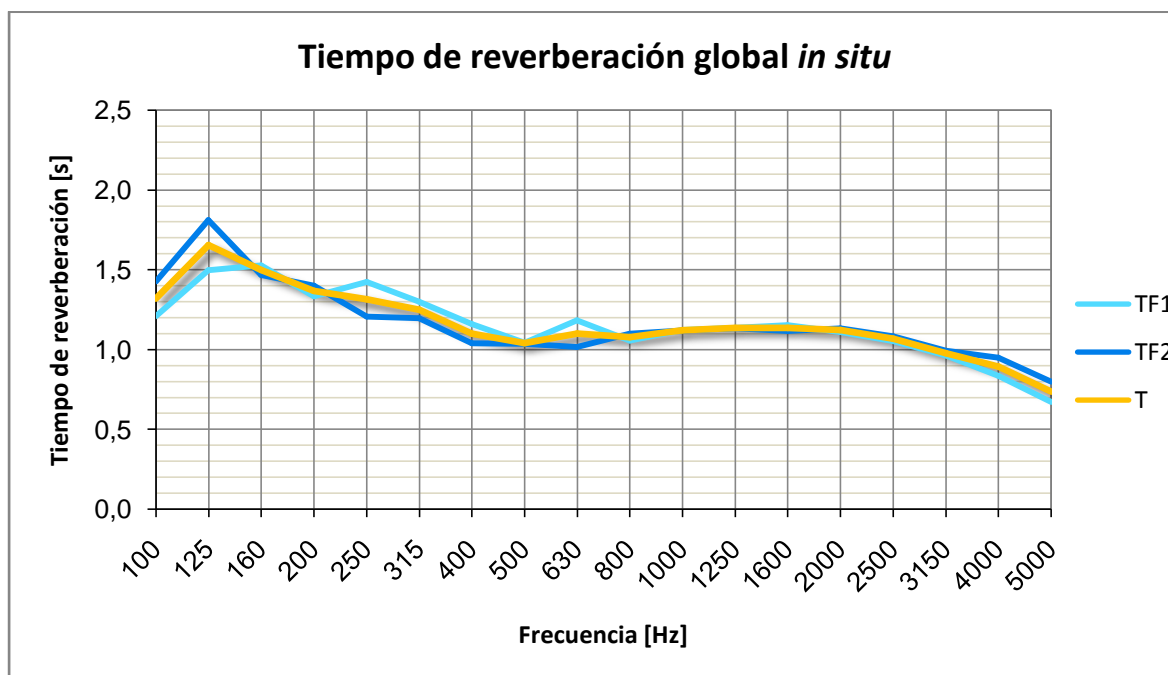


Figura 46. Tiempo de reverberación global.



Siguiendo la recomendación según la norma UNE-EN ISO 3382:2008¹⁰, el tiempo de reverberación medio del recinto se puede presentar tal como se muestra a continuación.

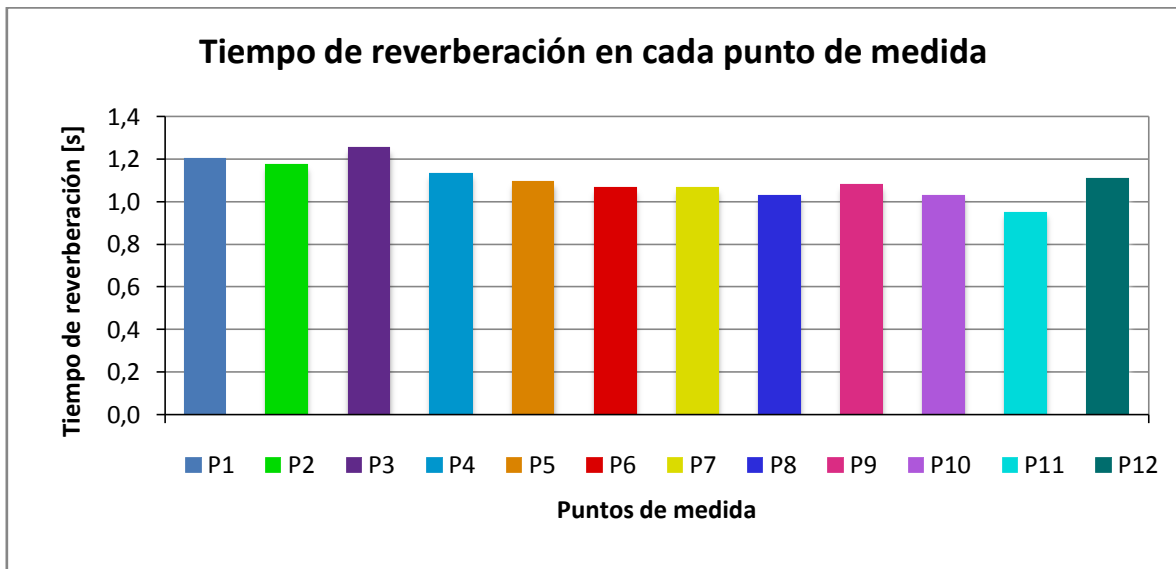


Figura 47. Tiempo de reverberación promedio en cada punto desde 400 Hz a 1250 Hz.

6.1.5 Análisis de resultados y conclusiones

Debido a la naturaleza aleatoria de la señal de excitación, la incertidumbre de la medida del tiempo de reverberación por el método del ruido interrumpido depende del número de promediados realizados.

En las figuras 44 y 45 se aprecia que en baja frecuencia existe una mayor desviación de los resultados correspondientes a las medidas realizadas en cada punto, es decir, la desviación existente entre las medidas realizadas es mayor en las bandas de frecuencia más baja.

Como se aprecia en la figura 46, correspondiente al promediado conjunto, el tiempo de reverberación es más alto a bajas frecuencias, disminuyendo de forma constante hasta aproximadamente 500 Hz, experimentando ligeras fluctuaciones en las siguientes bandas y un ligero aumento hasta que comienza a disminuir de nuevo a partir de la frecuencia de 1600 Hz.

Analizando la figura 47 se puede observar la similitud entre los tiempos de reverberación obtenidos en cada posición al realizar la medida, resultado del cual se puede deducir que en esas bandas de frecuencias el recinto posee un comportamiento uniforme.

¹⁰ UNE-EN ISO 3382:2008. *Medición del tiempo de reverberación con referencia a otros parámetros acústicos*. Permite presentar el promediado del tiempo de reverberación resultante obtenido en cada punto calculado desde la banda de 400 Hz hasta la banda de 1250 Hz en tercios de octava.





En último lugar, es necesario calcular los tiempos de reverberación óptimos para poder determinar los usos a los que se puede destinar el teatro-auditorio, como se definía en el apartado 3.2 correspondiente al Capítulo III, siguiendo la clasificación de los tiempos de reverberación según la valoración de Beranek.

A continuación se muestra el parámetro T_{mid} calculado según la fórmula 31. Si T_{mid} óptimo para la sala es calculado en función de su volumen tal y como se refleja en las fórmulas 32 y 33, se obtienen los valores T_{mid} máximos y mínimos, teniendo en cuenta que el volumen de la sala es de 9427 m^3 aproximadamente.

Parámetro	Valor
$T_{mid \text{ max}}$	1,46 s
T_{mid}	1,08 s
$T_{mid \text{ min}}$	0,94 s

Tabla 13. Tiempos T_{mid} calculados.

Por tanto, para el establecimiento de una valoración final del tiempo de reverberación del recinto en función de las medidas experimentales realizadas *in situ* y analizando los parámetros obtenidos a partir de estas medidas, se llega a las siguientes conclusiones.

El Teatro Tomás y Valiente se considera apto para representaciones destinadas a la reproducción de voz en lo que refiere a sus características acústicas, ya que para la palabra el valor óptimo de T_{mid} definido para salas de estas dimensiones oscila entre 1 s y 1,2 s.

Además, teniendo en cuenta los valores de T_{mid} óptimos máximos y mínimos calculados, el recinto puede ser destinado para uso musical ya que cumple con los criterios establecidos en la tabla 14, únicamente para música de cámara y ópera.

T_{mid} [s]	Tipo de música
1,8 – 2,0	Música sinfónica
1,6 – 1,8	Música clásica
1,3 – 1,7	Música de cámara
1,2 – 1,5	Ópera

Tabla 14. Valores óptimos de T_{mid} calculados para música.



6.2 Medida del ruido de fondo

El ruido de fondo es aquel que prevalece en ausencia de la emisión generada por la fuente que va a realizar la medida. Por definición, es todo aquel sonido no deseado, y en el campo de la acústica, uno de los principales parámetros que afecta negativamente a la calidad de las señales habladas o música transmitidas.

El objetivo de la evaluación del ruido de fondo a la hora de realizar ensayos acústicos es poder comparar los niveles de presión sonora obtenidos con los establecidos en el apartado 3.8 correspondiente al Capítulo III, con la finalidad de poder verificar el grado de cumplimiento de la normativa legal vigente en relación a los máximos niveles de ruido permitidos según el uso del recinto.

6.2.1 Condiciones de medida

El desarrollo de la actividad consiste en la determinación de mediciones del nivel de presión sonora del ruido de fondo. Siendo las condiciones de iluminación mínimas, manteniendo únicamente las luces encendidas en la zona del patio de butacas y el escenario. Además, se realizan dos tipos de medidas, una cuando el sistema de ventilación se encuentra encendido y otra cuando se encuentra apagado durante el tiempo que dure la realización de la medida.

Para su evaluación se toman los mismos puntos de medida descritos en el apartado 6.1 de medida del tiempo de reverberación, representados en la figura 44 y descritos en la tabla 9, para captar el nivel de presión sonora en ausencia de la fuente emisora.

6.2.2 Equipamiento y conexionado

Una vez establecidas las condiciones para la toma de medidas *in situ* es necesario describir el equipamiento a utilizar. En este caso, se precisa del mismo equipamiento descrito en la medida del tiempo de reverberación, en el apartado 6.1.2, aunque prescindiendo de la fuente emisora y consecuentemente del amplificador de potencia.

Para la adquisición de datos se emplea el sistema de medida externo denominado *Symphonie* definido anteriormente.

Un micrófono *G.R.A.S.* formado por un preamplificador del tipo 26AK y una cápsula de micrófono se conectan a la unidad de adquisición, de modo que los datos sean transferidos a un ordenador portátil mediante un interface PCMCIA y procesados por el software que incorpora el sistema, *dBbati32*, que realiza la medida automatizada del nivel de presión sonora del ruido de fondo.

Además, de nuevo es necesario el uso calibrador *Cal01* para comprobar la sensibilidad del micrófono previa a la medida.





A continuación se muestra un esquema del conexionado de los equipos empleados en el ensayo.

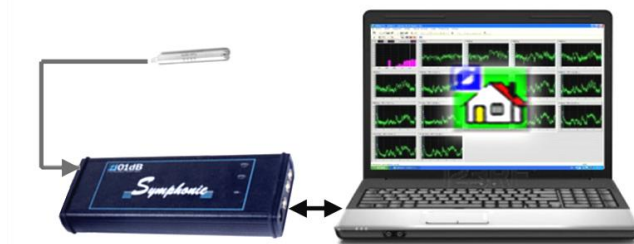


Figura 48. Esquema de conexionado para la evaluación del tiempo de reverberación.

El conexionado de la figura 48 es idéntico al definido en el apartado 6.1.2 correspondiente a la medida del tiempo de reverberación, aunque para evaluar el ruido de fondo no es necesaria la intervención de una señal emisora, por lo que puede ser desconectada tanto la fuente como el amplificador que la precede.

6.2.3 Método de evaluación y configuración de la medida

El método de evaluación del ensayo consiste en la toma de medidas del nivel de presión sonora del ruido de fondo para cada uno de los puntos definidos anteriormente y para las condiciones establecidas.

La configuración del sistema de medida únicamente difiere de la descrita en el apartado 6.1.3 referente a la medida del tiempo de reverberación, en que la selección en el controlador de gestión de medidas está destinada al ruido de fondo.

La configuración de parámetros se establece para frecuencias en bandas de tercio de octava desde 100 Hz a 5 kHz, y el tiempo de duración de la medida asignado es de 25 segundos para su automatización. También es necesario puntualizar la calibración previa del sistema de captación de medida para la verificación de su correcto funcionamiento.

6.2.4 Ejecución del proceso y presentación de resultados

Una vez realizado el conexionado, el software *dBbati32* ejecuta la medida de forma automática con la configuración definida en el anterior apartado, capturando los datos correspondientes a los niveles de presión sonora correspondientes al ruido de fondo en cada posición de medida de las zonas de audiencia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos y los análisis realizados para la posterior valoración de ruido en el recinto cuando el sistema de ventilación se encuentra encendido $L_p R_1$ y apagado $L_p R_2$.



f [Hz]	L _{P1}	L _{P2}	L _{P3}	L _{P4}	L _{P5}	L _{P6}	L _{P7}	L _{P8}	L _{P9}	L _{P10}	L _{P11}	L _{P12}	L _P R1	σ _{F1}
100	47,9	47,9	46,6	46,1	45,9	45,6	45,0	46,3	45,7	45,9	46,1	45,8	46,2	0,87
125	46,3	45,6	44,6	44,5	44,2	44,5	44,2	44,5	43,4	42,7	43,9	45,4	44,5	0,97
160	44,5	43,3	43,7	43,2	42,2	43,4	42,3	42,2	42,2	42,5	42,4	43,0	42,9	0,74
200	43,4	42,6	42,0	41,8	42,1	41,6	41,1	40,9	40,9	40,5	41,0	40,4	41,5	0,90
250	42,1	42,0	40,9	41,4	40,2	41,3	40,8	39,9	40,4	40,6	39,5	39,7	40,7	0,85
315	39,6	38,8	38,7	37,9	37,9	37,9	37,1	37,7	37,9	37,6	37,3	37,3	38,0	0,72
400	38,3	37,4	37,1	36,6	36,7	36,6	35,9	36,2	36,0	36,0	36,1	36,1	36,6	0,72
500	37,0	36,0	35,9	35,5	35,3	35,2	34,9	34,6	34,7	34,5	34,5	34,6	35,2	0,77
630	35,0	34,5	34,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,8	33,6	33,1	33,2	33,6	33,8	0,58
800	33,8	33,3	33,2	32,8	32,7	32,4	32,0	32,4	32,2	31,7	32,0	32,2	32,6	0,62
1000	32,5	32,2	32,0	31,5	31,5	31,5	31,0	31,1	30,9	30,9	30,9	31,1	31,4	0,55
1250	31,5	31,2	31,1	30,4	30,5	30,4	30,0	30,0	30,3	29,9	30,0	29,9	30,4	0,55
1600	30,7	30,2	30,1	29,8	29,6	29,7	29,4	29,5	29,5	29,3	29,6	29,3	29,7	0,42
2000	30,1	29,9	29,5	29,4	29,1	29,1	28,9	29,1	29,0	28,8	29,0	29,1	29,3	0,40
2500	29,6	29,4	29,3	28,9	28,8	28,9	28,6	28,7	28,7	28,6	28,6	28,7	28,9	0,34
3150	29,6	29,5	29,4	29,1	29,0	29,1	28,9	29,1	29,1	28,9	29,0	28,9	29,1	0,24
4000	29,8	29,8	29,6	29,6	29,5	29,4	29,3	29,6	29,3	29,3	29,4	29,4	29,5	0,18
5000	30,5	30,4	30,4	30,3	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2	30,1	30,2	30,2	30,3	0,12

Tabla 15. Ruido de fondo medido en cada punto con la ventilación encendida.

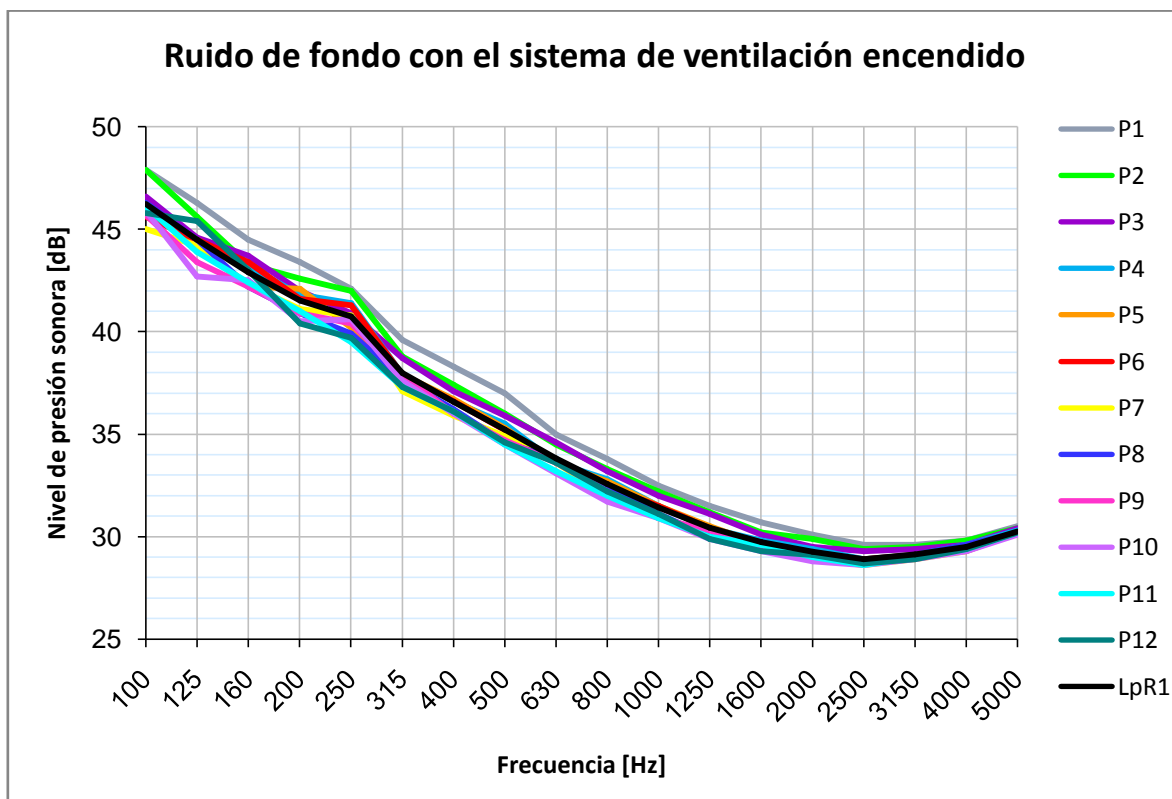


Figura 49. Ruido de fondo en cada punto con el sistema de ventilación encendido.



f [Hz]	L _{P1}	L _{P2}	L _{P3}	L _{P4}	L _{P5}	L _{P6}	L _{P7}	L _{P8}	L _{P9}	L _{P10}	L _{P11}	L _{P12}	L _P R2	σ _{F2}
100	45,5	45,2	45,0	46,0	45,0	45,5	45,9	45,7	45,7	44,8	45,1	45,3	45,4	0,38
125	44,0	44,3	43,5	43,5	43,4	44,4	43,4	43,4	43,7	43,5	43,2	43,2	43,6	0,40
160	42,4	42,1	41,4	42,5	41,8	42,3	42,4	42,0	42,5	42,1	41,1	42,4	42,1	0,45
200	40,9	41,0	40,8	40,0	40,6	40,5	40,3	40,2	40,0	40,6	40,1	39,6	40,4	0,42
250	38,9	39,0	39,1	39,0	38,8	39,3	38,8	39,0	38,8	38,7	38,2	38,4	38,8	0,30
315	37,4	37,1	37,2	37,6	37,4	37,3	36,9	37,6	37,3	37,3	37,3	37,5	37,3	0,20
400	36,0	35,7	35,4	36,2	35,6	35,8	35,6	36,0	35,7	35,8	35,8	36,0	35,8	0,22
500	34,1	34,5	34,5	34,5	34,7	34,7	34,6	34,4	34,2	34,0	34,6	34,4	34,4	0,23
630	33,1	33,0	33,1	33,2	33,3	33,2	33,1	33,1	33,2	33,3	32,9	33,2	33,1	0,12
800	31,9	32,0	31,7	32,1	31,8	32,3	32,0	32,1	31,8	31,7	31,7	31,9	31,9	0,19
1000	31,0	30,7	30,9	30,9	30,9	31,1	30,8	30,9	30,8	31,0	30,9	30,6	30,9	0,14
1250	30,0	30,0	30,0	29,8	30,0	30,1	30,1	30,2	30,1	29,9	30,0	30,1	30,0	0,11
1600	29,4	29,3	29,0	29,4	29,3	29,4	29,4	29,5	29,3	29,3	29,5	29,2	29,3	0,14
2000	28,9	28,8	28,7	29,0	29,0	28,8	29,0	29,0	28,9	28,9	28,9	29,0	28,9	0,10
2500	28,8	28,6	28,7	28,7	28,7	28,8	28,8	28,7	28,7	28,7	28,7	28,6	28,7	0,07
3150	29,1	28,8	29,1	29,1	29,0	29,2	29,0	29,0	29,1	29,0	29,0	29,0	29,0	0,10
4000	29,3	29,3	29,4	29,4	29,5	29,4	29,4	29,4	29,3	29,3	29,4	29,6	29,4	0,09
5000	30,1	30,2	30,1	30,1	30,2	30,2	30,2	30,3	30,3	30,2	30,2	30,3	30,2	0,07

Tabla 16. Ruido de fondo medido en cada punto con la ventilación apagada.

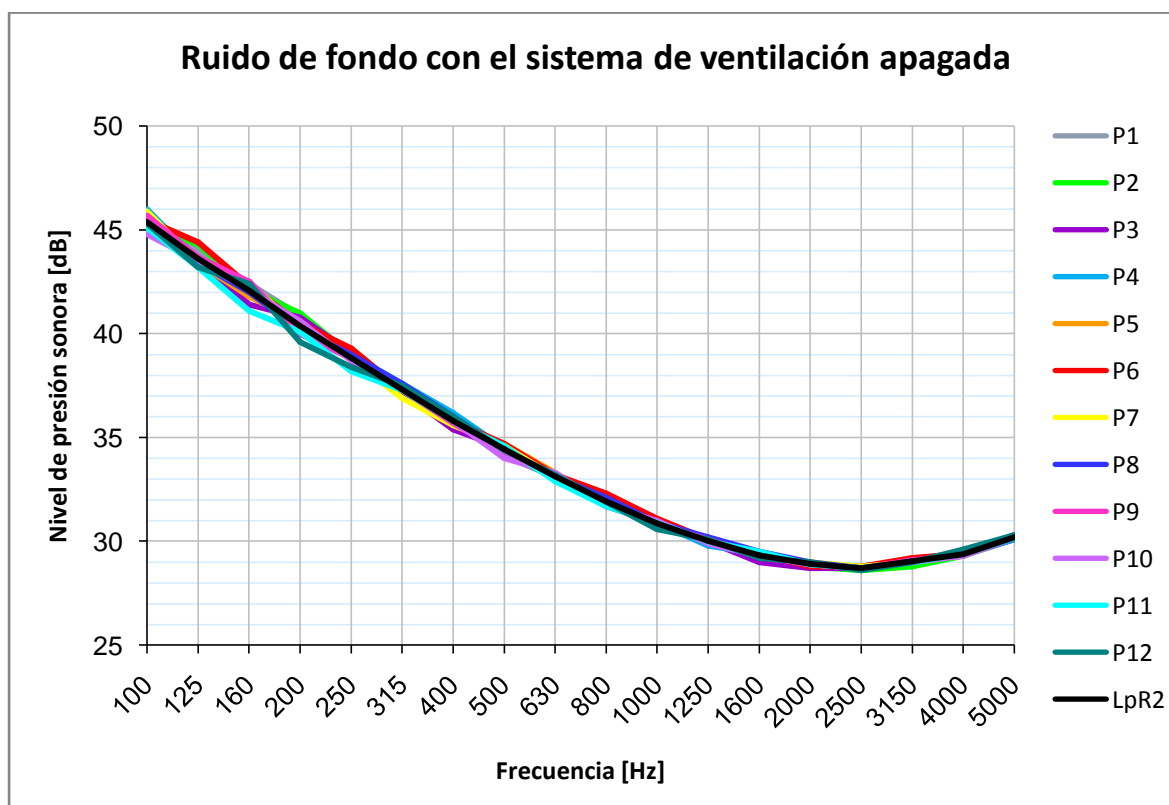


Figura 50. Ruido de fondo en cada punto con el sistema de ventilación apagado.



Con el objetivo de poder comparar los espectros de ruido de fondo medios obtenidos para ambas condiciones de ventilación se representa la siguiente figura de forma que se pueda analizar posteriormente.

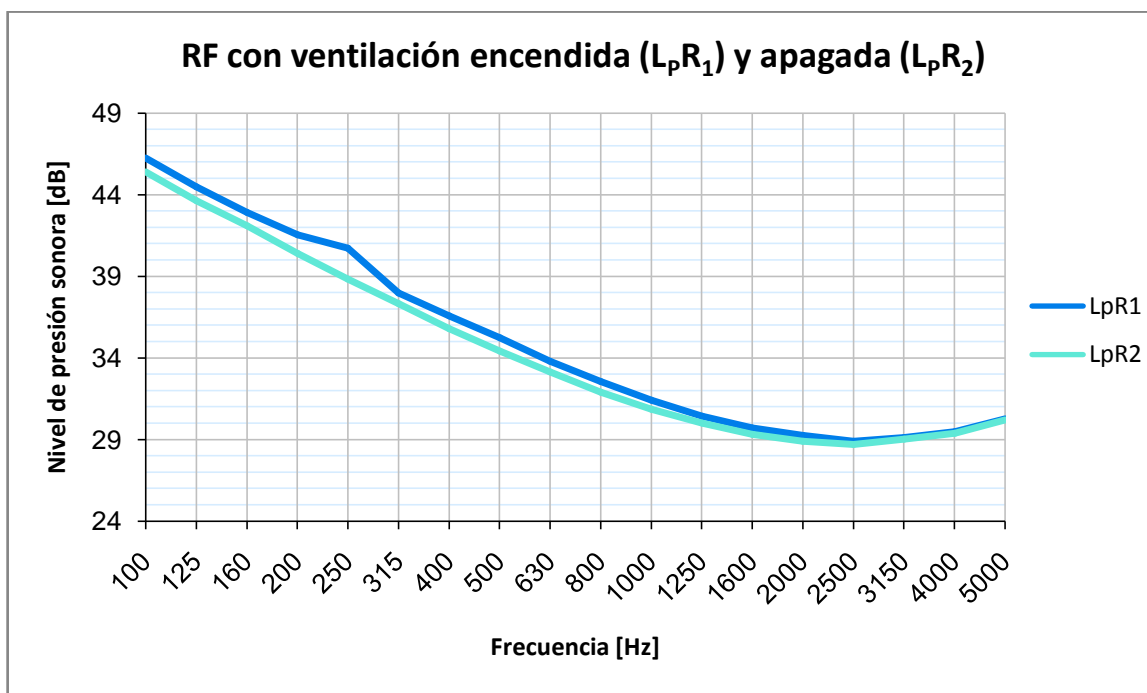


Figura 51. Niveles RF para condiciones de ventilación encendida y apagada.

6.2.5 Análisis de resultados y conclusiones

Una vez calculado un valor promedio del ruido de fondo para cada una de las condiciones de ventilación, L_{pR_1} y L_{pR_2} , correspondiente al promedio de los niveles medidos en cada punto de audiencia, es necesaria la conversión a bandas de octava para poder evaluar el ruido de fondo en la sala.

La razón reside en las características de criterios de valoración del ruido de los sistemas, en los cuales se definen curvas definidas en bandas de octava para una correcta evaluación.

f [Hz]	L_{pR_1} (oct)	L_{pR_2} (oct)
125	49,5	48,7
250	45,1	43,8
500	40,1	39,4
1000	36,3	35,8
2000	34,1	33,8
4000	34,4	34,3

Tabla 17. Conversión del nivel de ruido de fondo L_{pR} en bandas de octava.





6.2.5.1 Curvas RC

En primer lugar, se analizará el espectro de ruido de fondo medido conforme a los criterios de valoración de ruido que definen las curvas RC (*Room-Noise Criterion*) que consideran criterios de enmascaramiento de comunicación y vibración inducida por ruido en frecuencias bajas además de proporcionar una útil información tanto sobre el nivel de presión sonora como sobre el carácter subjetivo de un espectro sonoro, diferenciando entre las molestas sensaciones de retumbo (R), siseo (H), tonalidad (T) y neutralidad (N).

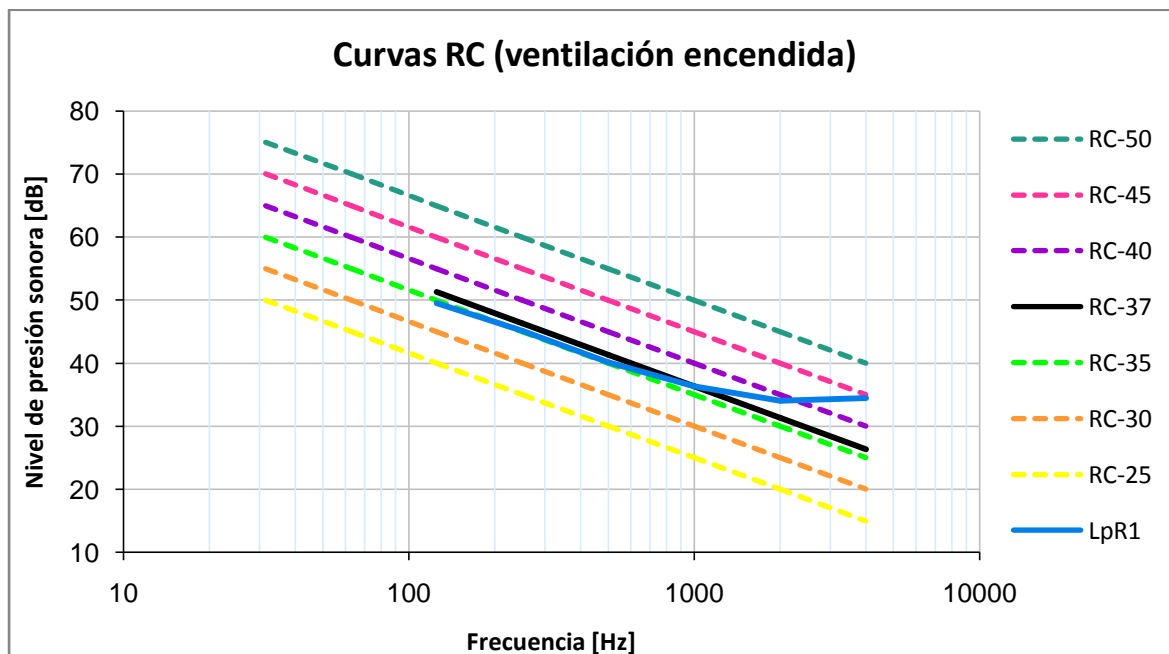


Figura 52. L_{pR1} conforme a curvas RC para ventilación encendida.

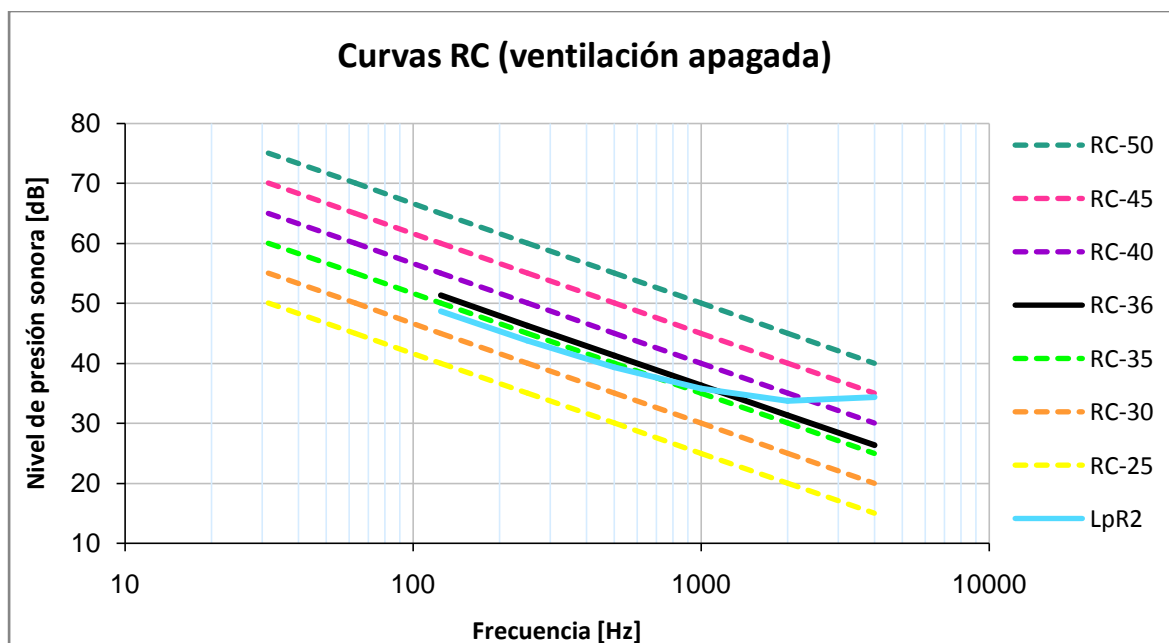


Figura 53. L_{pR2} conforme a curvas RC para ventilación apagada.



Según el criterio RC es necesario calcular en primer lugar el parámetro SIL del espectro de ruido, definido como el promedio de los niveles de presión sonora en bandas de octava de las frecuencias de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz, tal y como se indica en la siguiente fórmula.

$$SIL = \frac{L_{500 \text{ Hz}} + L_{1 \text{ kHz}} + L_{2 \text{ kHz}}}{3} \quad (44)$$

Calculado el parámetro SIL a partir de los valores de los niveles de presión sonora de ruido en bandas de octava, presentes en la tabla 17 y representados en las figuras 52 y 53, la curva RC-SIL que caracteriza la sala se corresponde con RC-37 cuando las condiciones de ventilación son nulas y RC-36 en caso contrario, estando identificadas en color negro, mientras que el espectro de ruido en bandas de octava L_pR se encuentra en color azul.

En el caso de la valoración de ruido con ventilación encendida, se puede apreciar que el espectro sobresale por encima de la curva RC-37 a partir de la frecuencia de 2 kHz en más de 3dB, por lo que se caracterizaría al recinto como siseante (H).

En el caso de la ventilación apagada ocurre prácticamente lo mismo que en el caso anterior, ya que se aprecia que el espectro también sobresale por encima de la curva RC-36 a partir de la frecuencia de 2 kHz, por lo que se mantiene el criterio de recinto siseante (H).

Además ambos espectros presentan un cambio abrupto de pendiente entre dos frecuencias adyacentes de más de 3 dB, desde 125 Hz a 500 Hz, por lo que el espectro de ruido obtenido al realizar las medidas también se caracteriza como tonal (T).

Tras el análisis, la valoración final de los criterios de ruido según curvas RC es para ventilación encendida RC-37 (H, T), y para ventilación apagada RC-36 (H, T).

6.2.5.2 Curvas NCB

En segundo lugar se procede a analizar el espectro de ruido de fondo medido conforme a los criterios que definen las curvas NCB (*Balanced Noise Criterion Curves*) para determinar la aceptabilidad de la comunicación de la palabra.

Creadas por Beranek, se aplican a recintos cerrados y establecen niveles de presión sonora referenciales en frecuencias de banda de octava para el ruido de fondo de forma que se pueda clasificar como siseante o retumbante.

Según el criterio NCB es necesario calcular el parámetro SIL del espectro de ruido, definido como el promedio de los niveles de presión sonora en bandas de octava de las frecuencias de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, denominadas frecuencias conversacionales.

$$SIL = \frac{L_{500 \text{ Hz}} + L_{1 \text{ kHz}} + L_{2 \text{ kHz}} + L_{4 \text{ kHz}}}{4} \quad (45)$$



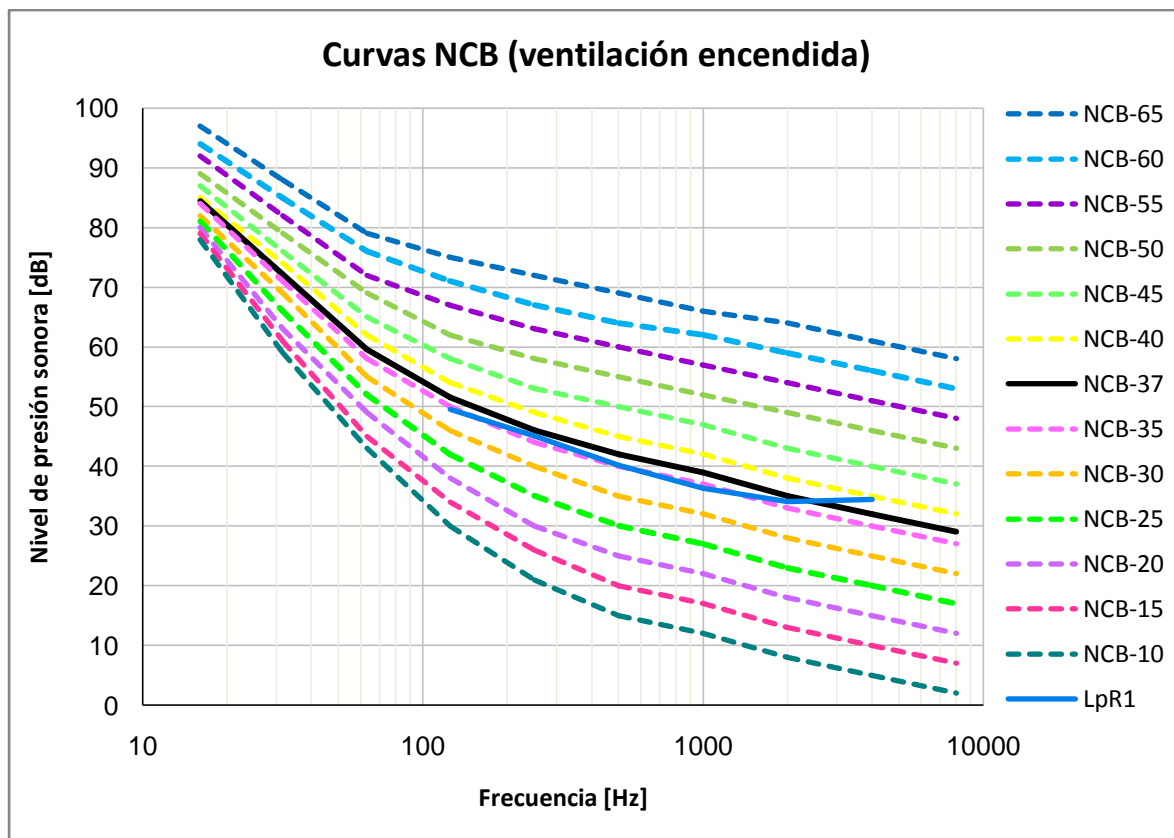


Figura 54. L_{pR1} frente a curvas NCB para ventilación encendida.

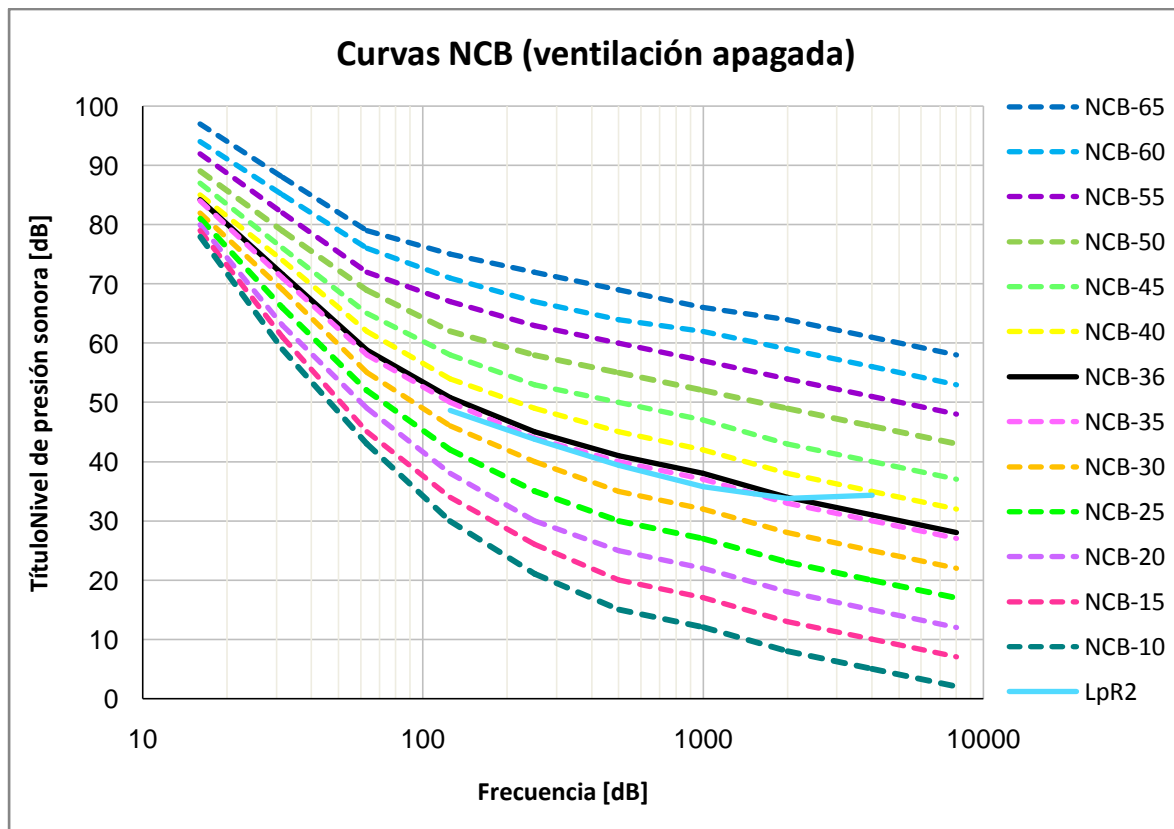


Figura 55. L_{pR2} frente a curvas NCB para ventilación apagada.



Calculado el parámetro SIL a partir de los valores obtenidos en la tabla 17 y representado en la figuras 54y 55, la curva NCB-SIL que caracteriza la sala se corresponde con la curva NCB-37 si la ventilación está encendida y NCB-36 si se encuentra apagada.

Teniendo en cuenta que para este tipo de salas la curva NCB-SIL obtenida no debe exceder la curva NCB-30, como se indica en la tabla 7 correspondiente al apartado 3.8.3 del Capítulo III. Se puede considerar que el auditorio no es apto en relación al ruido de fondo ya que las curvas obtenidas en ambos casos (NCB-36 y NCB-37) supera el umbral de nivel de ruido que establecen las curvas NCB para auditorios.

Además, según el criterio de curvas NCB se analiza si el ruido es o no retumbante. Para ello se compara el espectro de ruido de fondo con la curva NCB-SIL + 3 dB y el nivel de presión sonora del ruido medido en frecuencias inferiores a 500 Hz, correspondiéndose con las curvas NCB-40 y NCB-39 para ventilación encendida y apagada respectivamente.

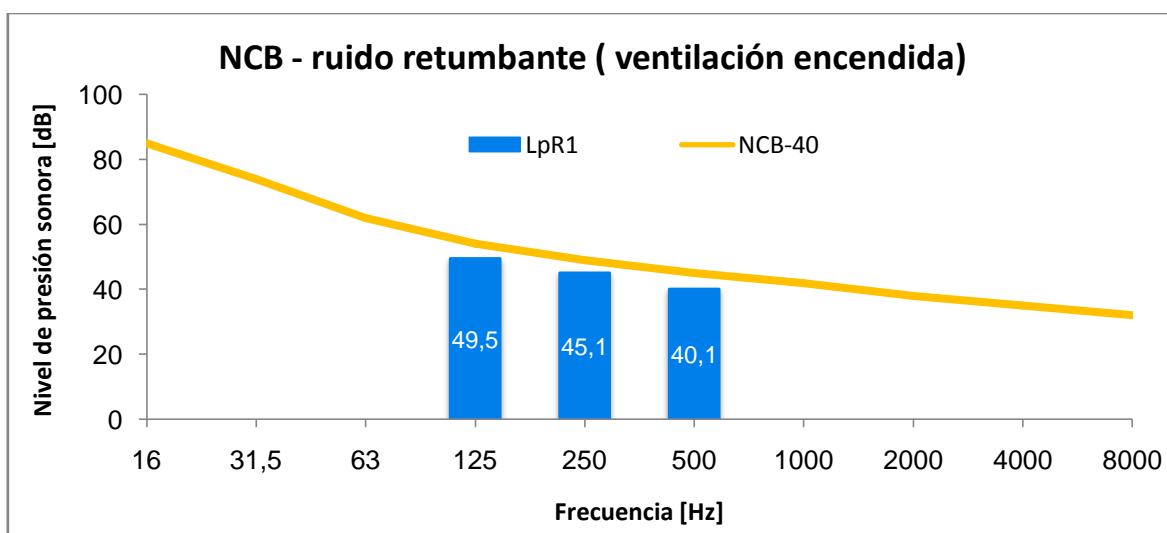


Figura 56. Evaluación de ruido retumbante de L_{pR1} para ventilación encendida.

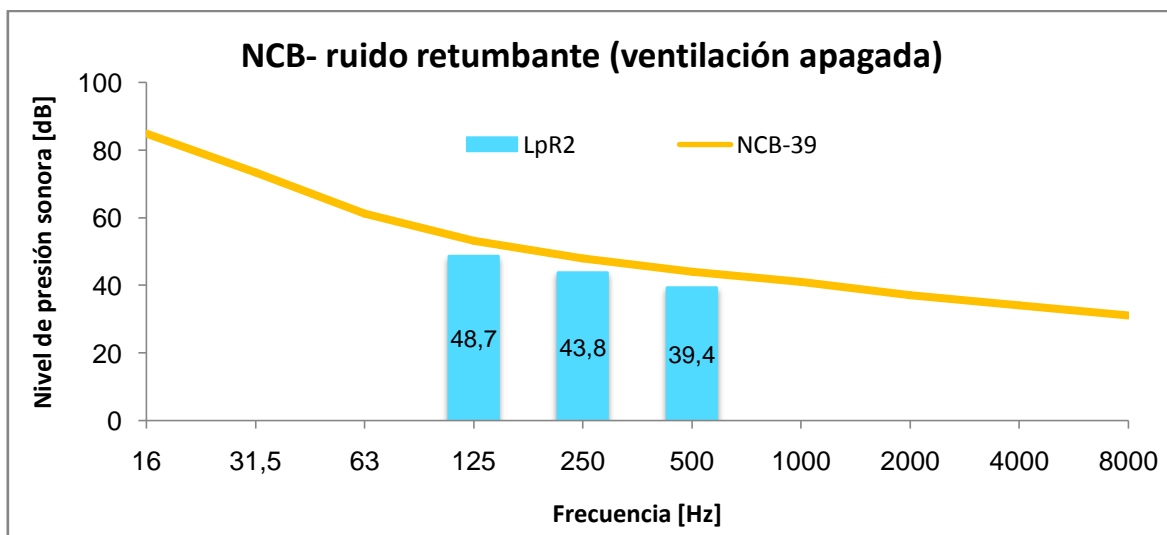


Figura 57. Evaluación de ruido retumbante de L_{pR2} para ventilación apagada.





En la figuras 56 y 57 se puede apreciar que ningún valor del espectro de ruido medido por debajo de 500 Hz supera la curva NCB-40 y NCB-39 para ambas situaciones de ventilación, por lo que se deduce que el tipo de ruido presente en la sala no se califica de tipo retumbante.

Para analizar si el ruido medido es de tipo siseante es necesario seleccionar la curva NCB que mejor se adapte a las frecuencias de 125 Hz, 250 Hz y 500 Hz y compararla con el nivel de presión sonora del ruido medio en frecuencias superiores a 1 kHz.

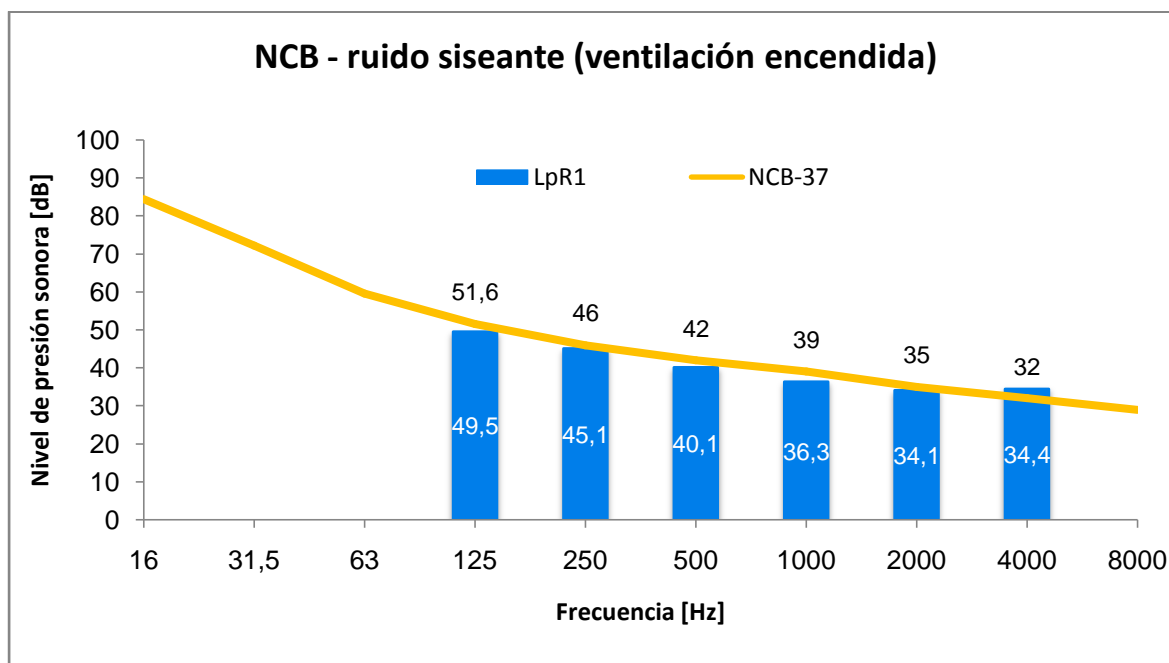


Figura 58. Evaluación de ruido siseante de L_{pR1} para ventilación encendida.

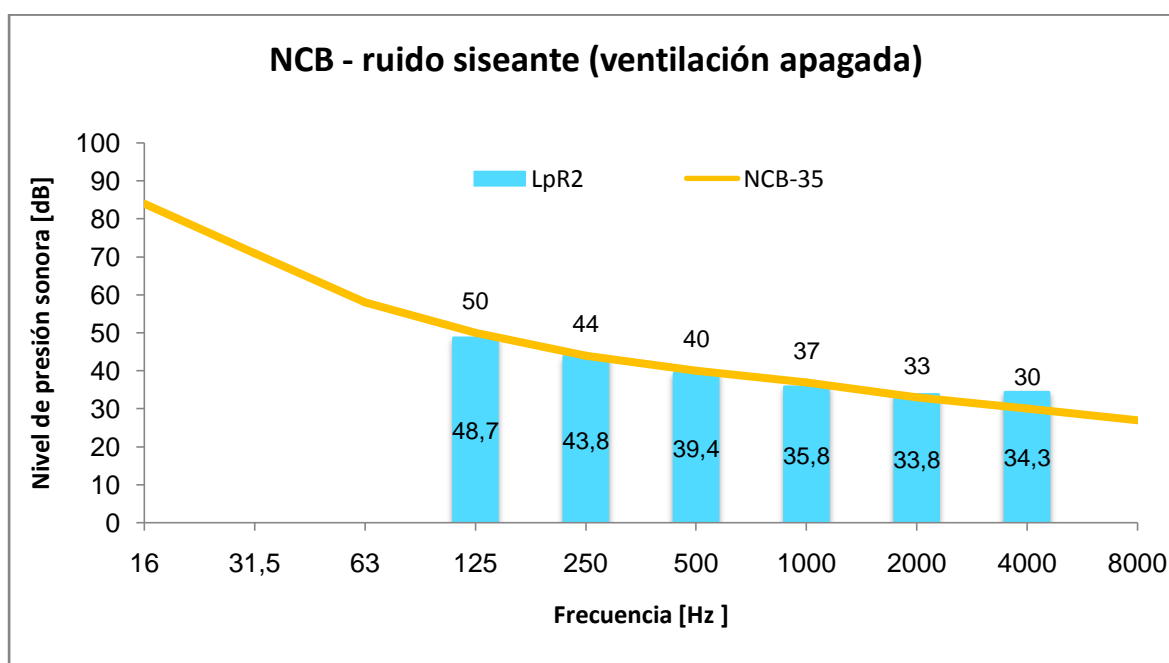


Figura 59. Evaluación de ruido siseante de L_{pR2} para ventilación apagada.



Como se aprecia en la figura 58, el espectro de ruido medido por encima de 4 kHz supera la curva que mejor se adapta a las frecuencias entre 125 Hz y 500 Hz en bandas de octava siendo NCB-37 la curva elegida en caso de que la ventilación esté encendida. Esto quiere decir que el ruido de fondo en el recinto cuando la ventilación está encendida se puede calificar como siseante, por lo que en la banda de 4 kHz el ruido de fondo ha de someterse a una corrección.

Del mismo modo en la figura 59, el espectro de ruido medido supera a la curva que mejor se adapta a las frecuencias entre 125 Hz y 500 Hz (NCB-35 para ventilación apagada) a partir de la frecuencia de 2 kHz, por lo que en las bandas superiores el ruido de fondo ha de someterse a una corrección para que el ruido de fondo no se califique de tipo siseante.

Para suprimir este efecto negativo se han de reducir los niveles en las bandas que presentan el problema. Para el caso de la ventilación encendida es necesario reducir el nivel de ruido de fondo en 2,4 dB a la frecuencia de 4 kHz y en caso de que las condiciones de ventilación sean nulas será necesaria una reducción de 0,8 dB en la banda de 2 kHz y 4,3 dB en la banda de 4 kHz para ajustarse al criterio NCB y evitar la molestia a los ocupantes.

Tras el análisis anterior se llega a la conclusión de que la molestia producida por el ruido de fondo presente en la sala no es causa únicamente del sistema de ventilación ya que el efecto persiste cuando la ventilación se encuentra apagada, por lo que es necesario plantear una solución ante las fuentes de ruido ajenas al sistema de ventilación del auditorio.

Bajo las condiciones expuestas, se puede afirmar que el ruido de fondo que pueda proceder del exterior del teatro permitirá obtener un confort acústico adecuado para el desarrollo de las distintas actividades que se lleven a cabo en el interior del mismo.

La solución planteada es la disminución del nivel de ruido que emiten las fuentes que producen la molestia siseante a altas frecuencias, como son las fuentes de iluminación y maquinaria escénica procedentes del interior del recinto.





CAPÍTULO VII



MODELO INFORMÁTICO DEL TEATRO EN EASE



7. MODELO INFORMÁTICO DEL TEATRO EN EASE

En este apartado se estudian los parámetros acústicos que caracterizan el teatro mediante simulaciones del modelo informático de la sala, utilizando para ello el programa de simulación electroacústica de recintos EASE en su versión 4.3, un software que proporciona una herramienta para el estudio del comportamiento acústico de un recinto, además de numerosas herramientas de diseño y análisis del mismo.

EASE 4.3 permite el diseño del modelo acústico del recinto en tres dimensiones, además de la simulación de las propiedades físicas y de propagación del sonido en el interior de la sala, así como la absorción que se produce en las distintas superficies de la misma y las distintas reflexiones que se produzcan en cada una. Adicionalmente permite la posibilidad de instalar sistemas de refuerzo sonoro de forma que pueda realizarse un diseño electroacústico en la sala a analizar.

A continuación se muestra el proceso de diseño del modelo acústico del Teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada, la simulación de los distintos parámetros acústicos sobre el mismo a través de EASE y sus posteriores análisis.

7.1 Diseño del modelo acústico del recinto

El punto de partida para trabajar con EASE y poder realizar las simulaciones necesarias es el diseño del recinto inicial, en este caso del Teatro Tomás y Valiente de Fuenlabrada, el cual se ha realizado a partir de los planos del teatro proporcionados por el Ayuntamiento de Fuenlabrada y medidas *in situ* con un medidor de longitud láser.

En primer lugar, a partir de un origen de coordenadas, se generan los vértices que conforman las distintas superficies del modelo a diseñar en tres dimensiones, mostrando a continuación el resultado del trazado de las distintas superficies que forman el recinto.

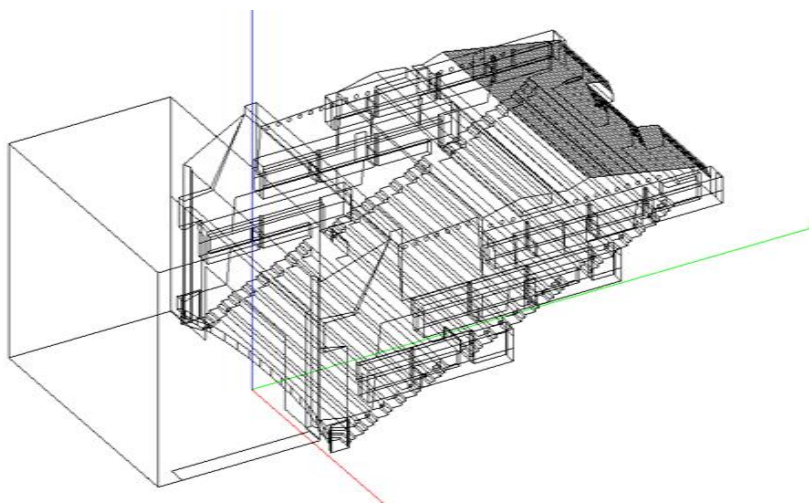


Figura 60. Proyección en perspectiva del diseño del teatro en 3D obtenido en EASE.

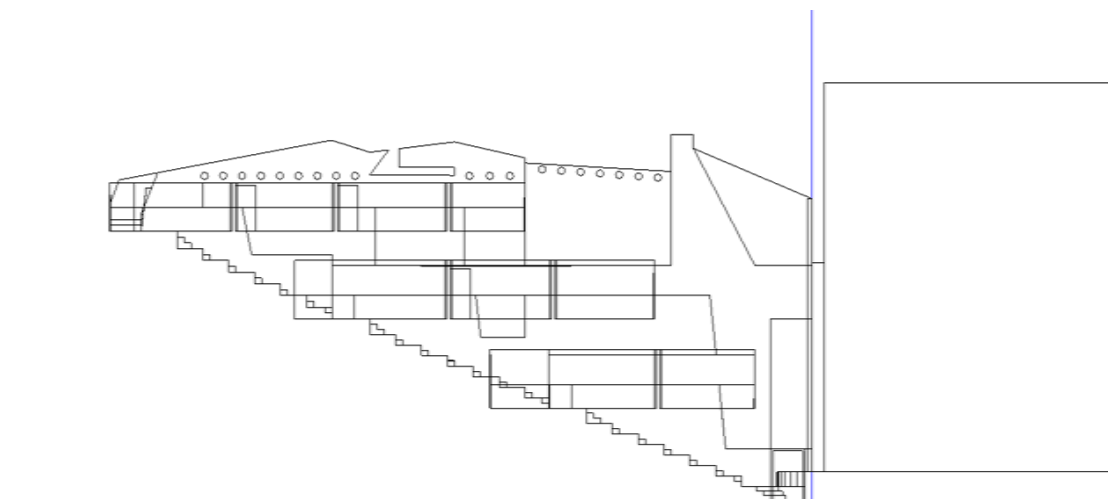


Figura 61. Proyección en alzado del modelo acústico del teatro en 3D.

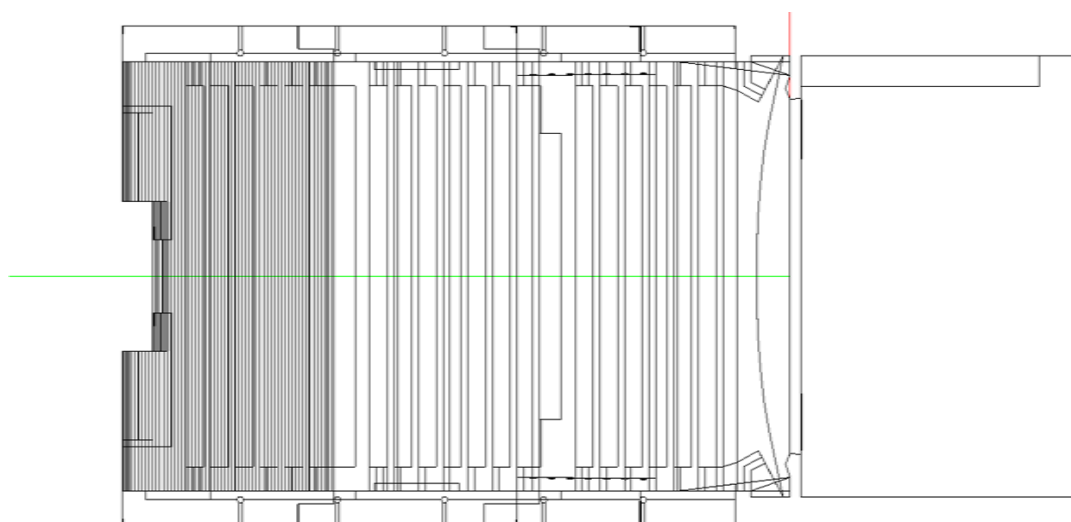


Figura 62. Proyección en planta del modelo acústico del teatro en 3D.

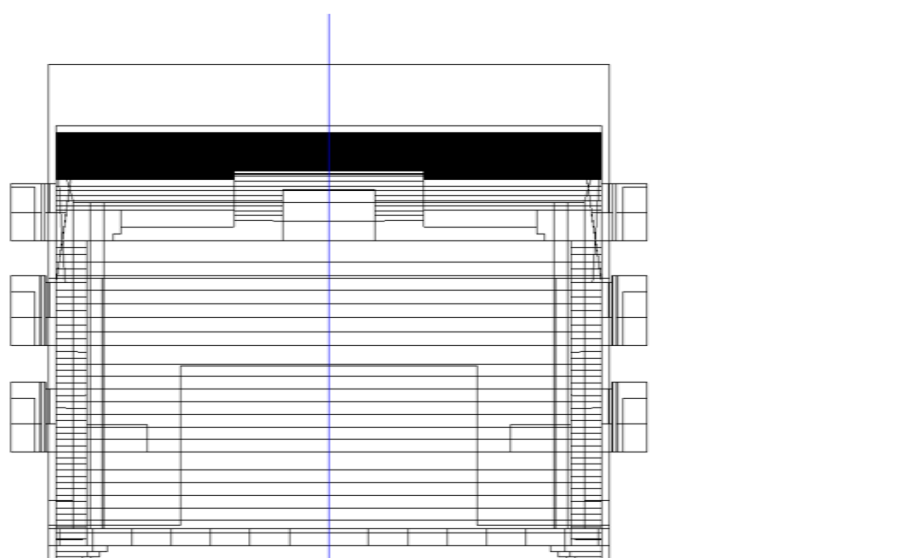


Figura 63. Proyección frontal del modelo acústico del teatro en 3D.



7.2 Asignación de materiales

Teniendo en cuenta la importancia que desempeñan los materiales a la hora de obtener los distintos parámetros acústicos de una sala, una vez concluido el diseño en tres dimensiones es necesario asignar a cada una de las superficies que conforman el recinto los materiales que las recubren con sus correspondientes coeficientes de absorción sonora.

EASE permite introducir las características de estos materiales para poder realizar los cálculos acústicos de forma que se asemejen a la realidad. Para ello se crea una base de datos que contiene los materiales que más se aproximan a las características del teatro sometido a estudio, tanto en su composición, como en sus propiedades de absorción [2].

De cada material editado ha sido precisa la modificación los coeficientes de absorción sonora para que la simulación del tiempo de reverberación se asemeje lo máximo posible a las medidas realizadas *in situ*, de forma que el ajuste represente una desviación mínima con respecto a la realidad. Esta fase de adecuación se debe realizar ya que en baja frecuencia la absorción depende del tamaño de los paneles, su fijación y el hueco normalmente relleno de lana de roca por detrás no visto, sin alterar esta modificación más de un 10 %.

Para el caso de las frecuencias por debajo de 125 Hz ha sido necesario reducir los coeficientes de los materiales compuestos por madera y las butacas ya que la parte trasera de estas es de plástico. A continuación se muestra una descripción general de cada material obtenido en el modelo acústico y sus coeficientes de absorción en las siguientes tablas.

Material	Descripción
Parquet	Suelo de zonas de audiencia con listones madera barnizados.
Butacas	Butacas tapizadas de tela, vacías y ocupadas con público.
Ladrillo pintado	Muro de ladrillo pintado perteneciente a un lateral del escenario.
Moqueta de pared	Moqueta sobre paredes las de zonas de audiencia.
Panel DIN	Panel de lana de vidrio que recubre techo del patio de butacas.
Hormigón	Muro de hormigón pintado del escenario.
Telón	Telón de terciopelo fruncido.
Tarima de madera	Entarimado de madera correspondiente al suelo del escenario.
Madera barnizada	Paneles de madera barnizada de paredes de zonas de audiencia.
Pladur	Placas de yeso pertenecientes a muro separador de palcos.
Madera perforada	Paneles de madera perforados rellenos de material absorbente.
Panel Acustisón-50A	Panel acústico de chapa multiperforado.
Vidrio	Cristal de la sala de control de luces y sonido.
Conductos de aire	Ventilación y foso de bambalinas del escenario.

Tabla 18. Descripción de materiales presentes en el modelo acústico.





Coeficiente de absorción α	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Butacas vacías	0,09	0,12	0,14	0,16	0,15	0,14
Butacas ocupadas	0,30	0,35	0,42	0,46	0,48	0,40
Ladrillo pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Moqueta de pared	0,09	0,08	0,21	0,27	0,30	0,37
Panel DIN	0,52	0,75	0,71	0,55	0,31	0,16
Hormigón	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Telón	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
Tarima de madera	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,07
Madera barnizada	0,10	0,11	0,06	0,08	0,08	0,11
Pladur	0,20	0,35	0,50	0,60	0,70	0,60
Madera perforada	0,40	0,90	0,80	0,50	0,40	0,30
Panel Acustisón-50A	0,20	0,70	1,00	1,00	0,95	0,85
Vidrio	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Conductos de aire	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 19. Coeficientes de absorción de los materiales del modelo acústico.

A continuación se representan las curvas de absorción para cada uno de los materiales asignados a las distintas superficies del teatro, resultado de la interpolación de los valores de α en las frecuencias intermedias en tercio de octava que aparecen en la tabla 19.

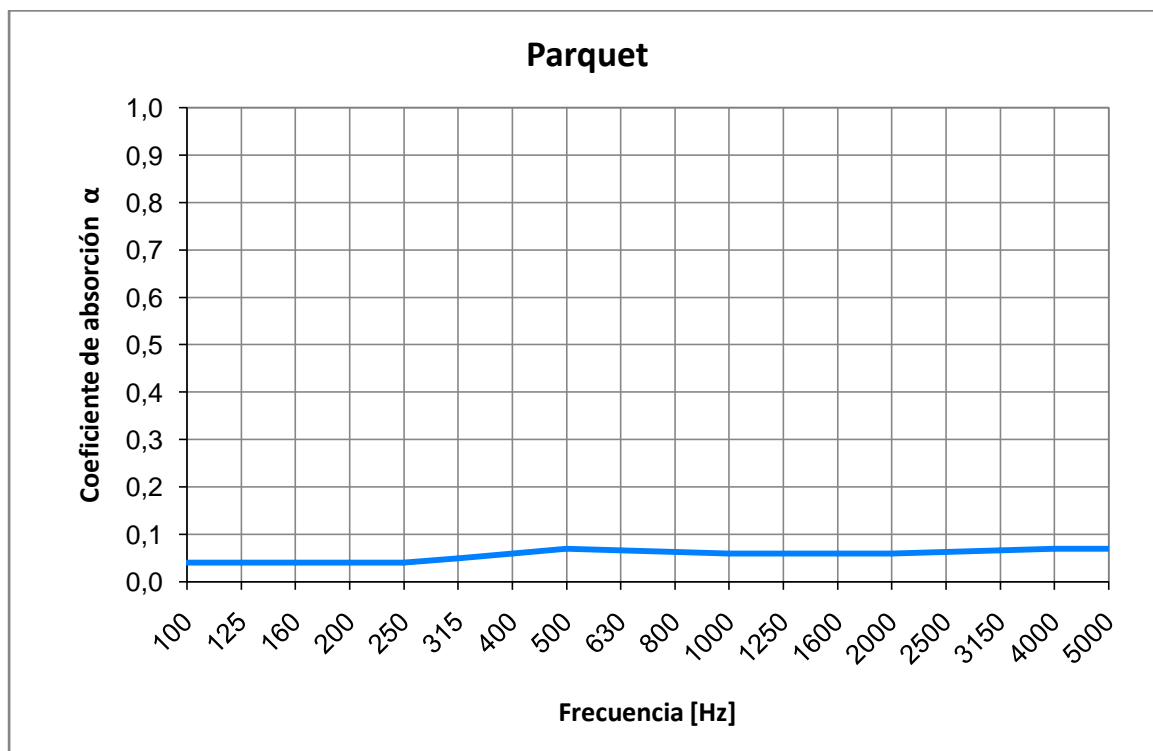


Figura 64. Absorción del parquet empleado en el modelo acústico.

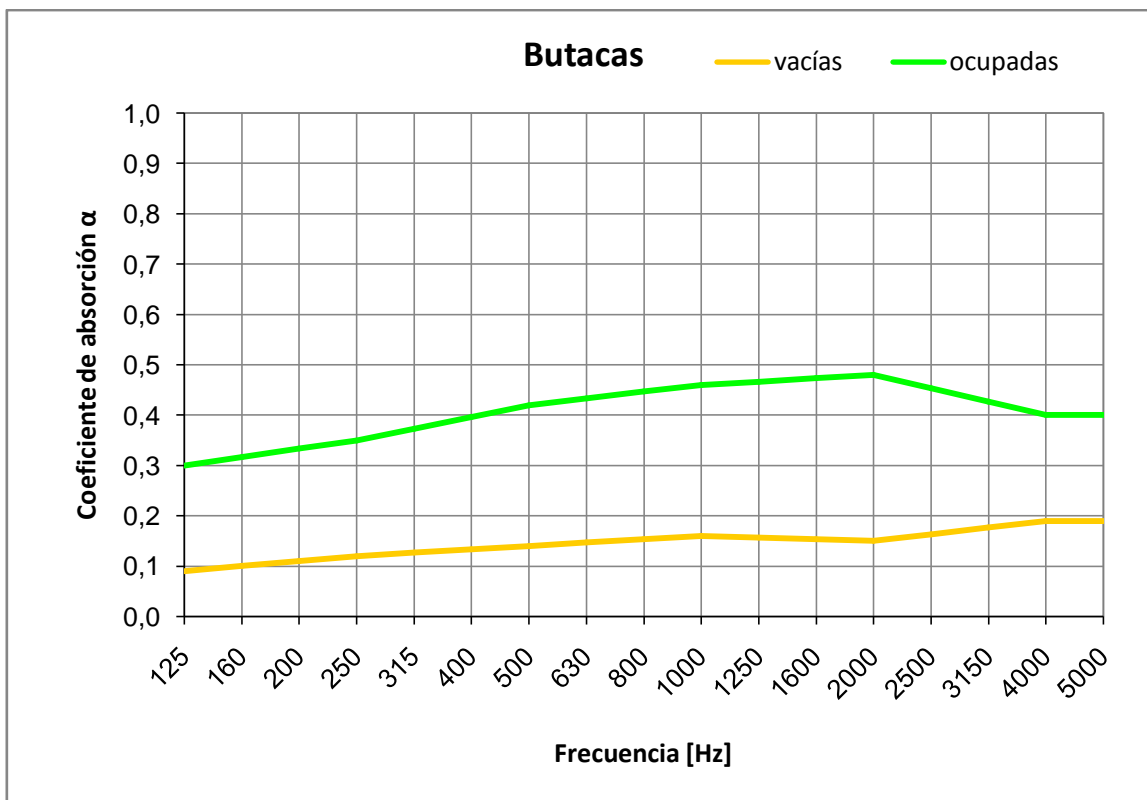


Figura 65. Absorción del material de las butacas empleado en el modelo acústico.

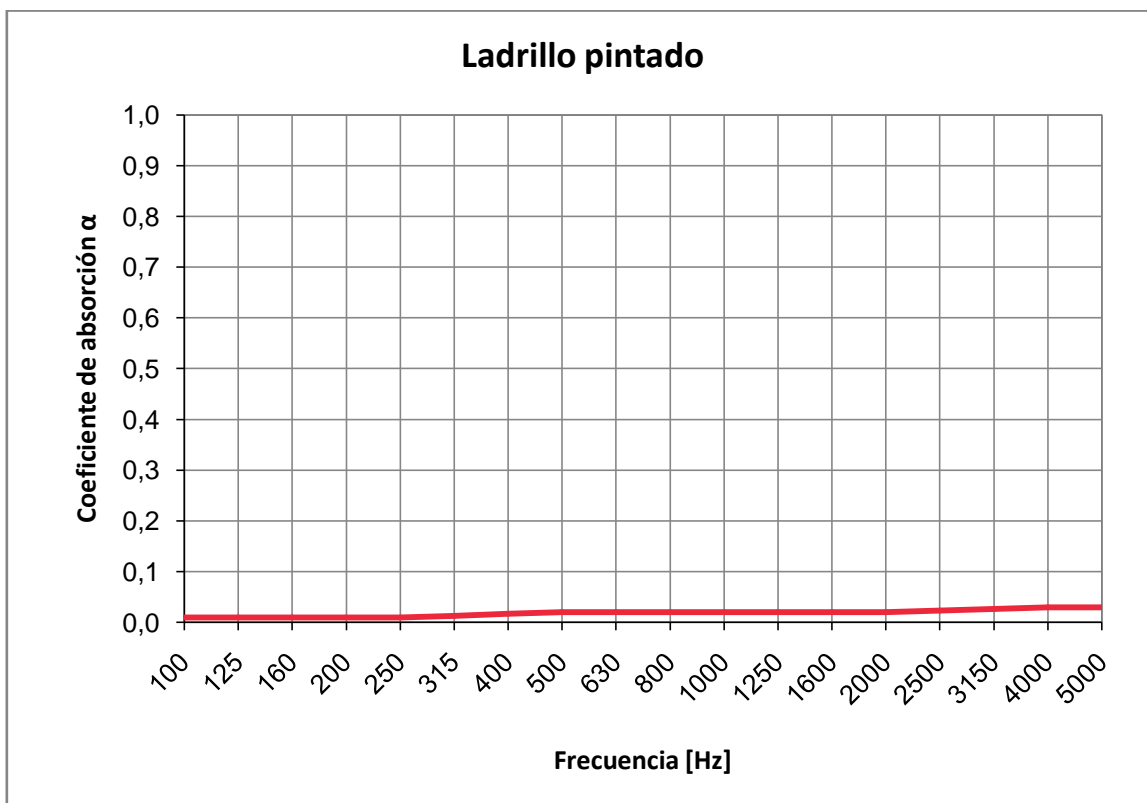


Figura 66. Absorción de la pared de ladrillo pintado empleado en el modelo acústico.

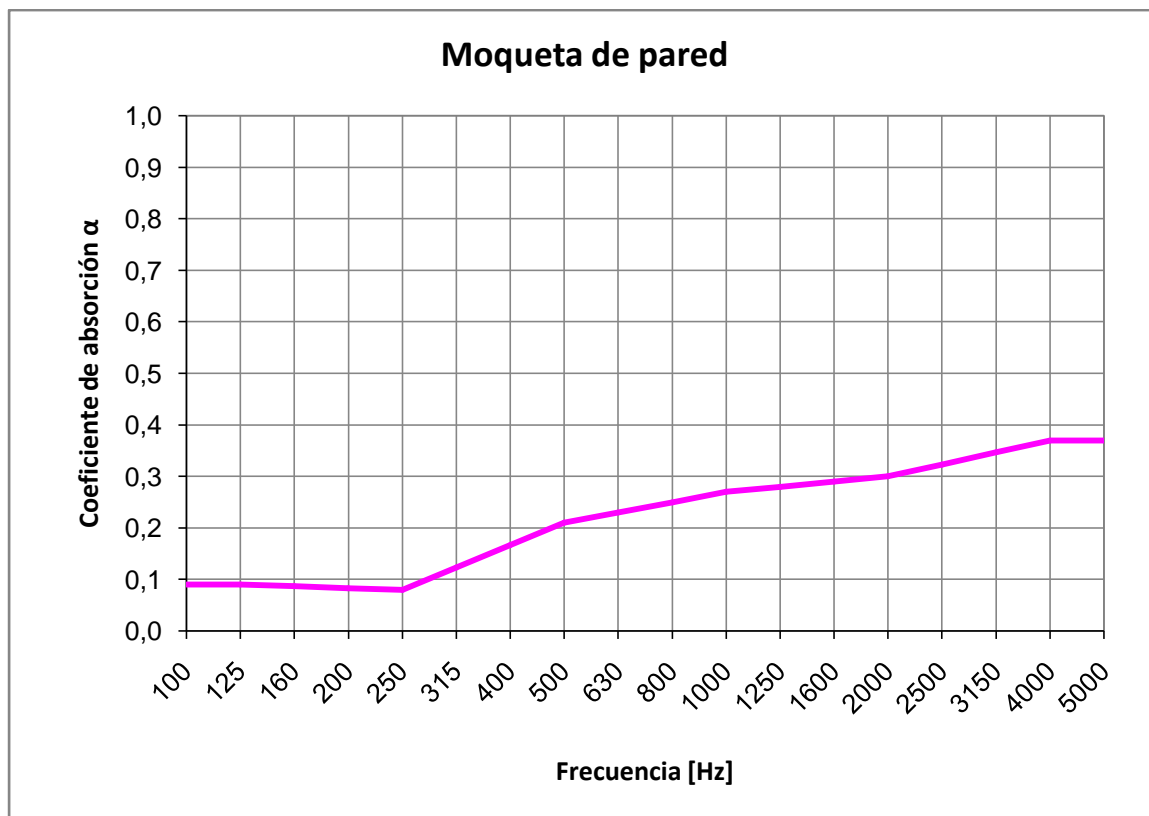


Figura 67. Absorción de la moqueta de pared empleada en el modelo acústico.

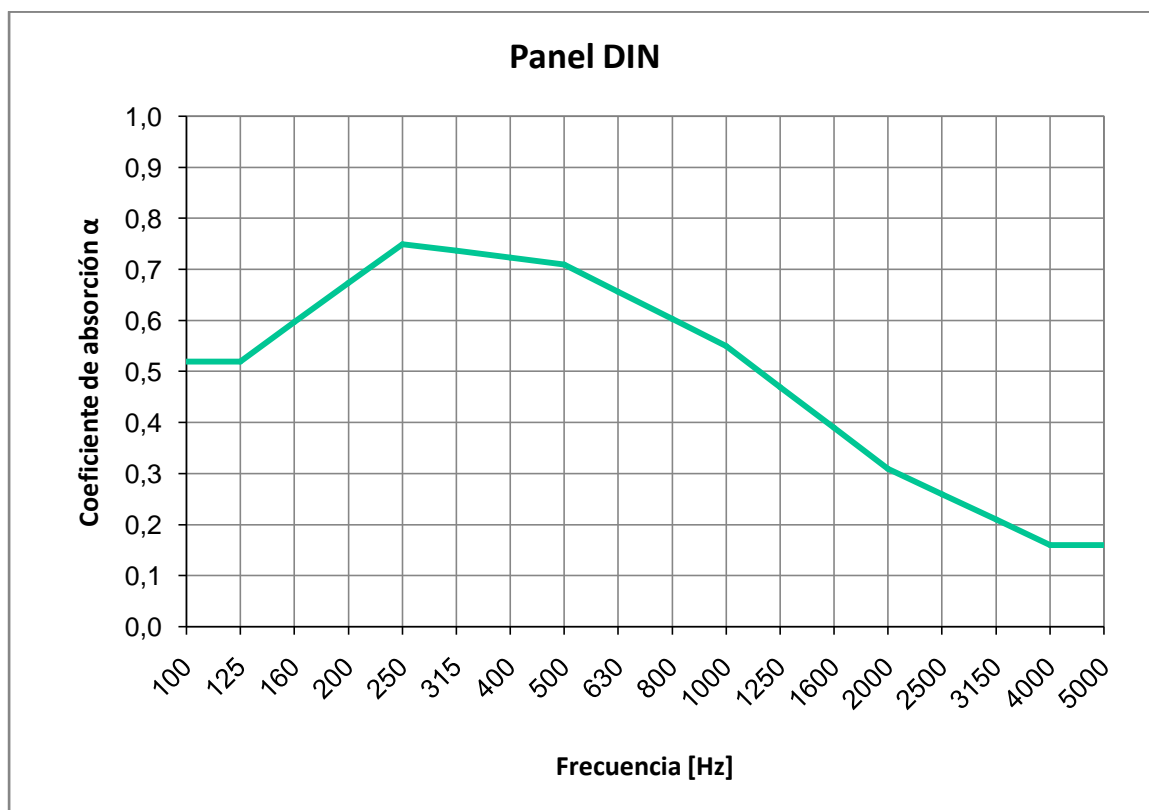


Figura 68. Absorción del panel DIN empleado en el modelo acústico.

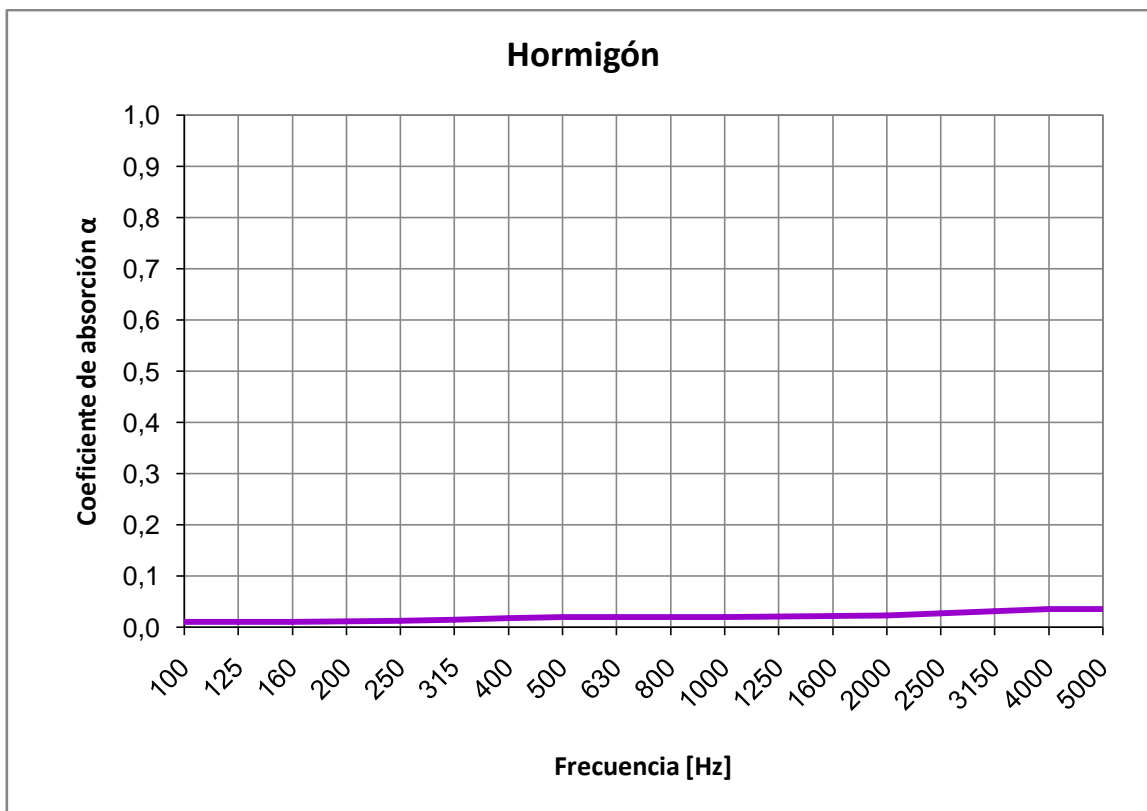


Figura 69. Absorción del hormigón empleado en el modelo acústico.

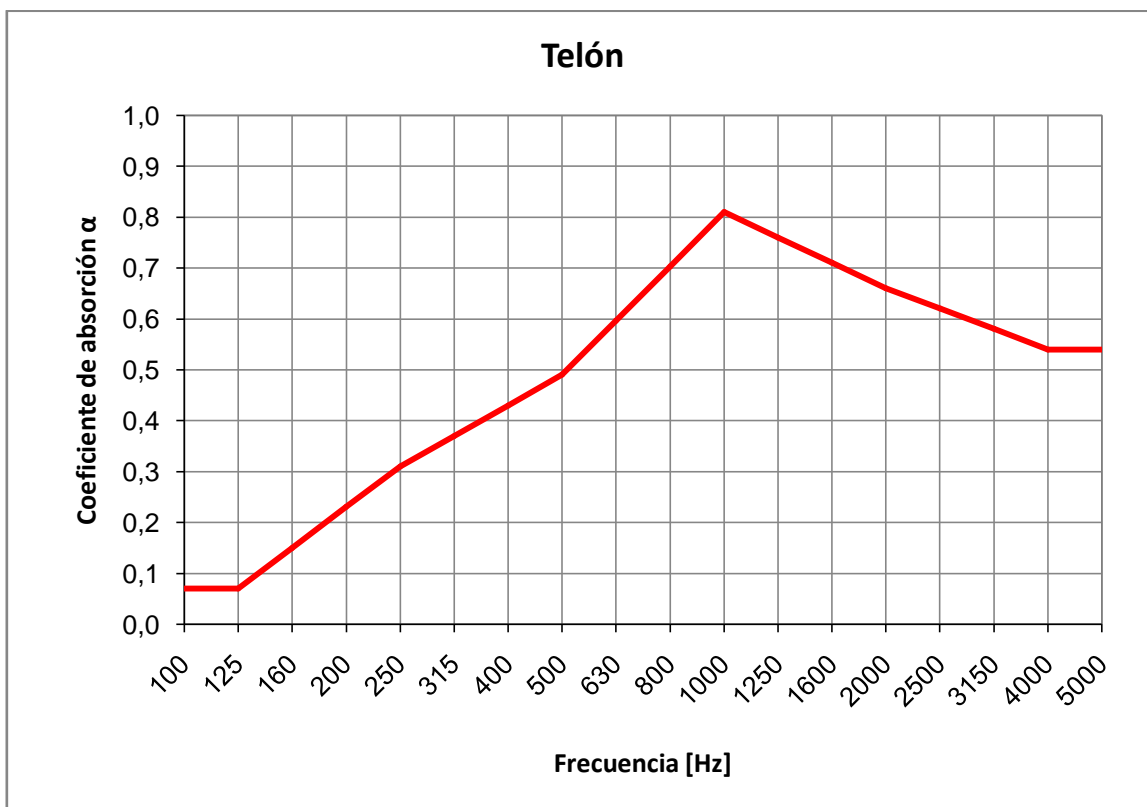


Figura 70. Absorción del telón empleado en el modelo acústico.

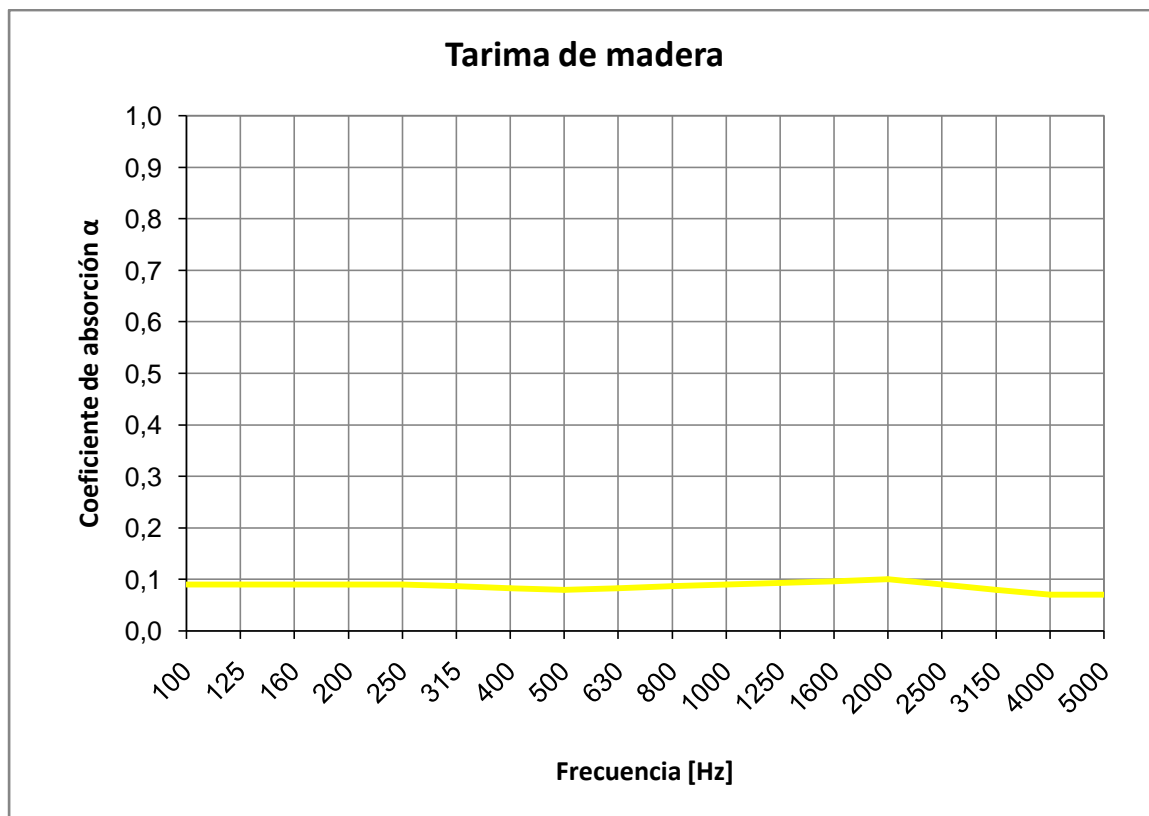


Figura 71. Absorción de la tarima de madera empleada en el modelo acústico.

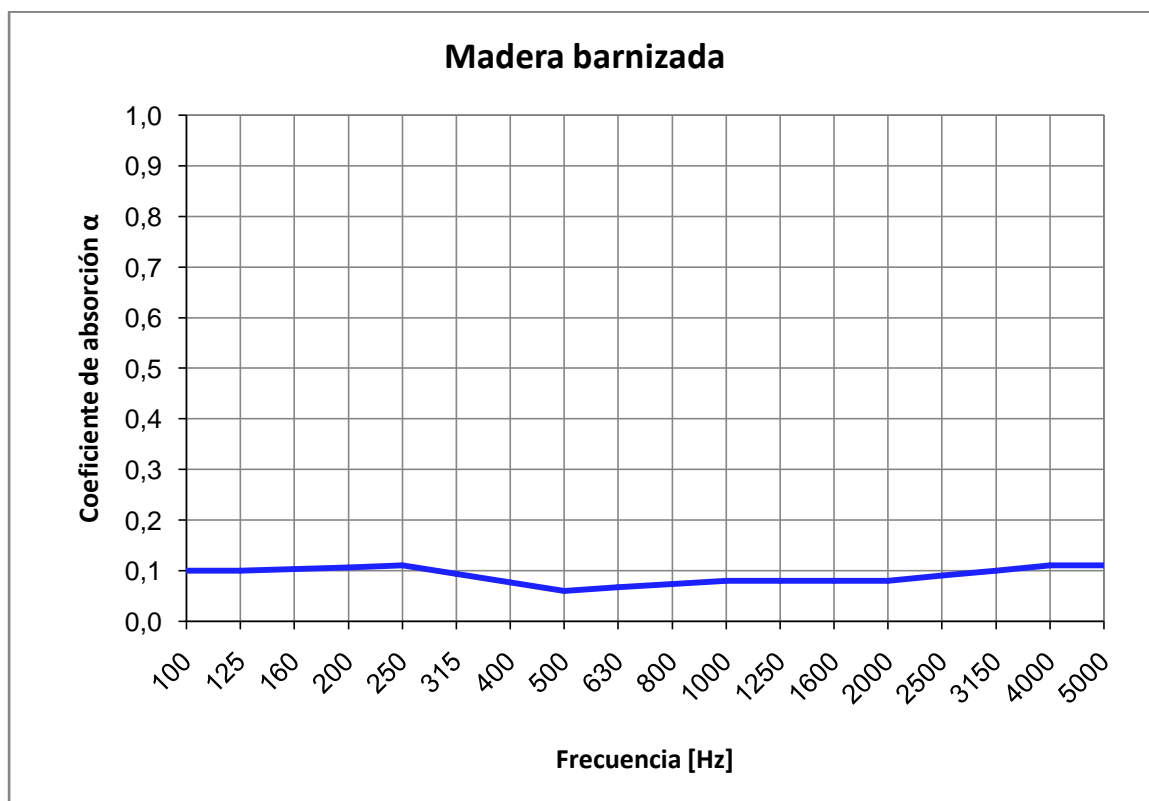


Figura 72. Absorción de la madera barnizada empleada en el modelo acústico.

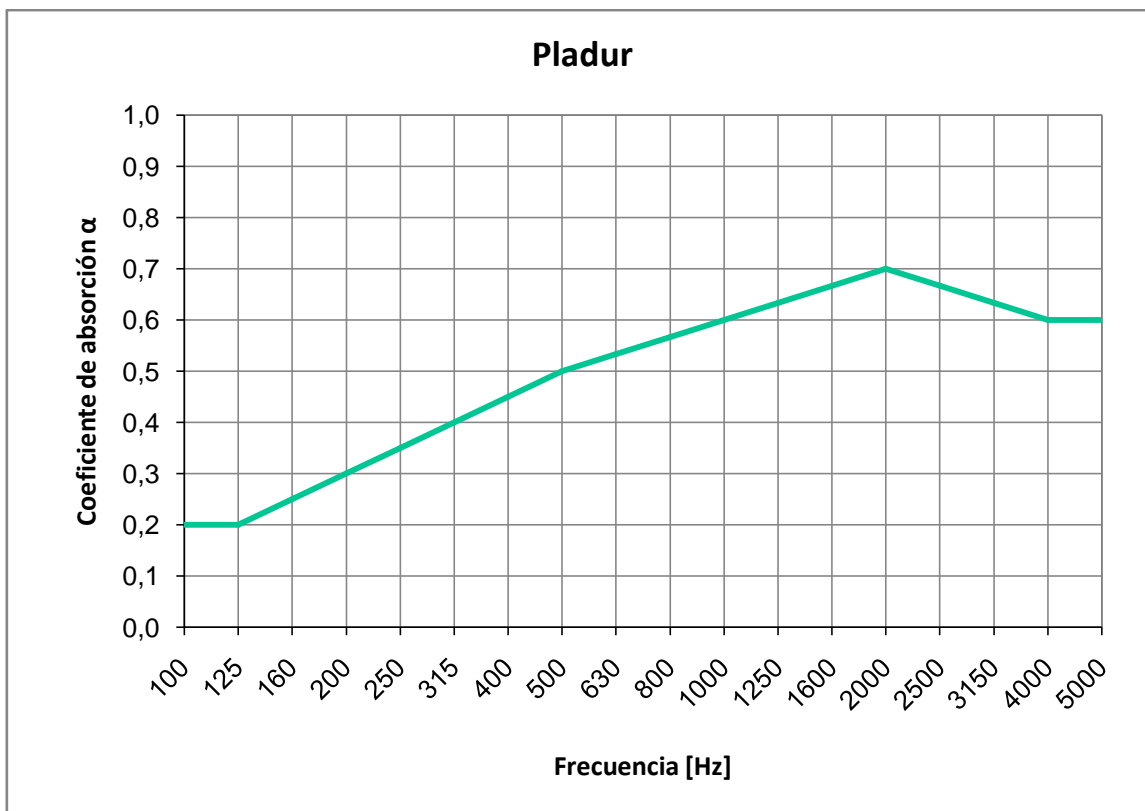


Figura 73. Absorción del pladur empleado en el modelo acústico.

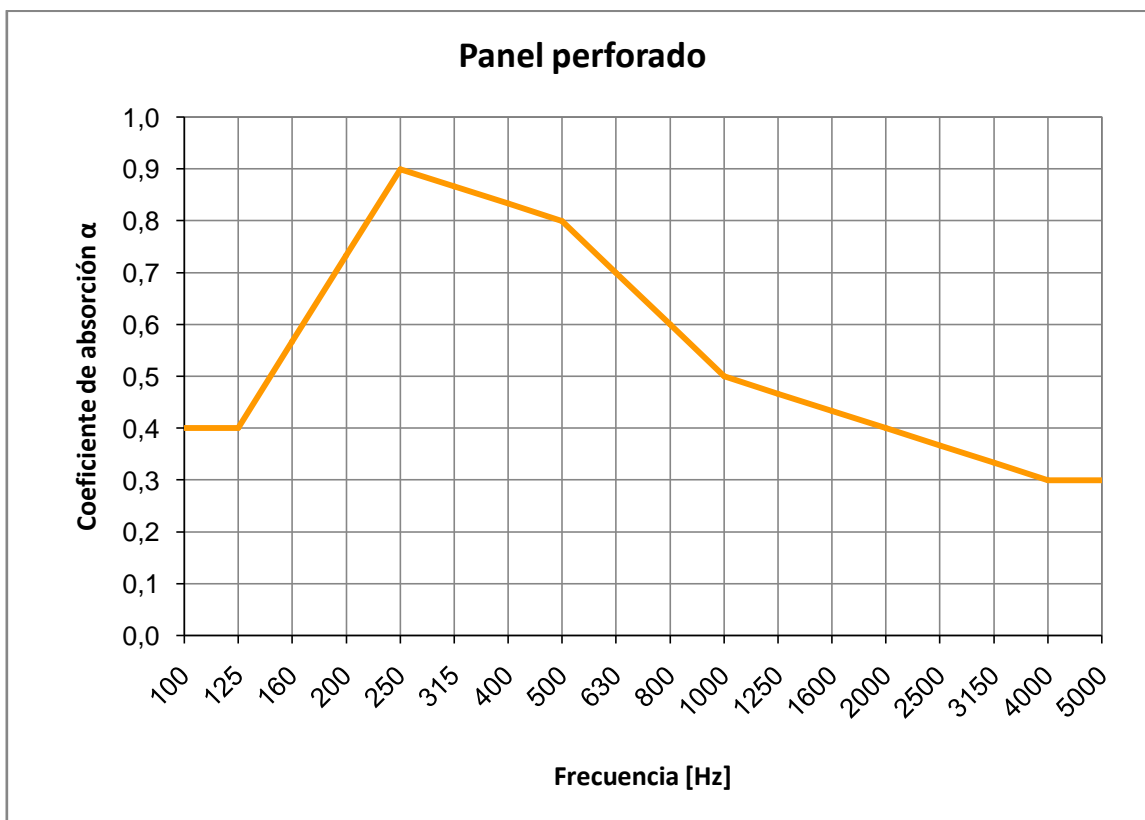


Figura 74. Absorción del panel perforado empleado en el modelo acústico.

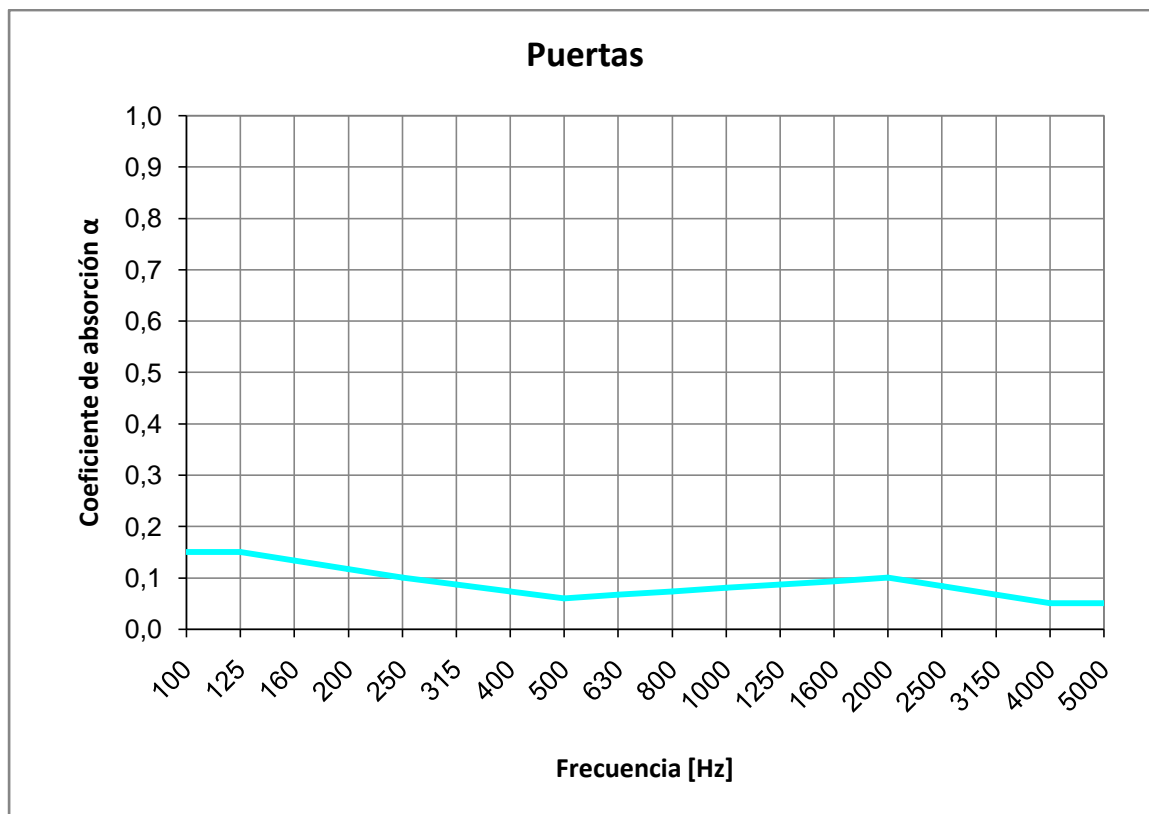


Figura 75. Absorción del material de las puertas empleado en el modelo acústico.

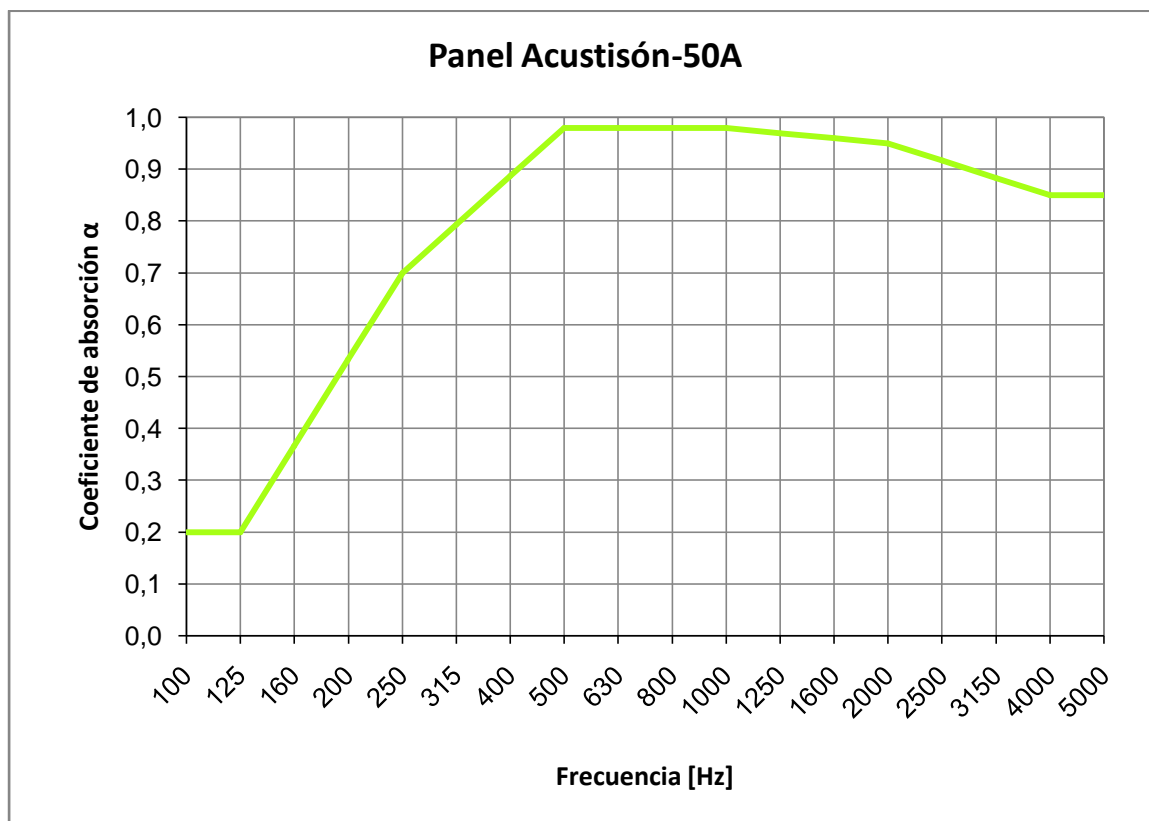


Figura 76. Absorción del panel Acustisón-50A empleado en el modelo acústico.

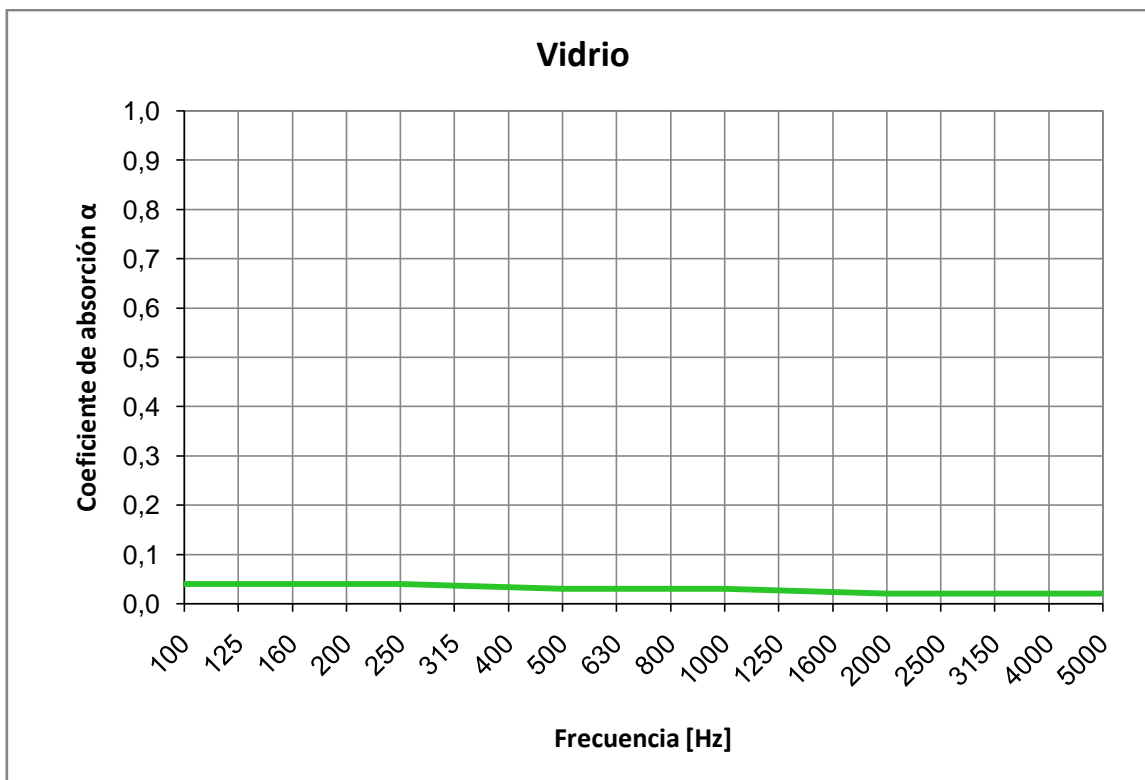


Figura 77. Absorción del vidrio empleado en el modelo acústico.

A continuación se detalla la colocación de cada material sobre cada una de las superficies que recubre, asignando un código de color distinto a cada uno, facilitando de esta forma la visualización de materiales sobre el modelo acústico diseñado. Éste código de color también se corresponde con el proporcionado en las curvas de absorción de materiales presentes en las anteriores figuras, de forma que la interpretación visual de la asignación de materiales sobre el recinto sea más rápida.

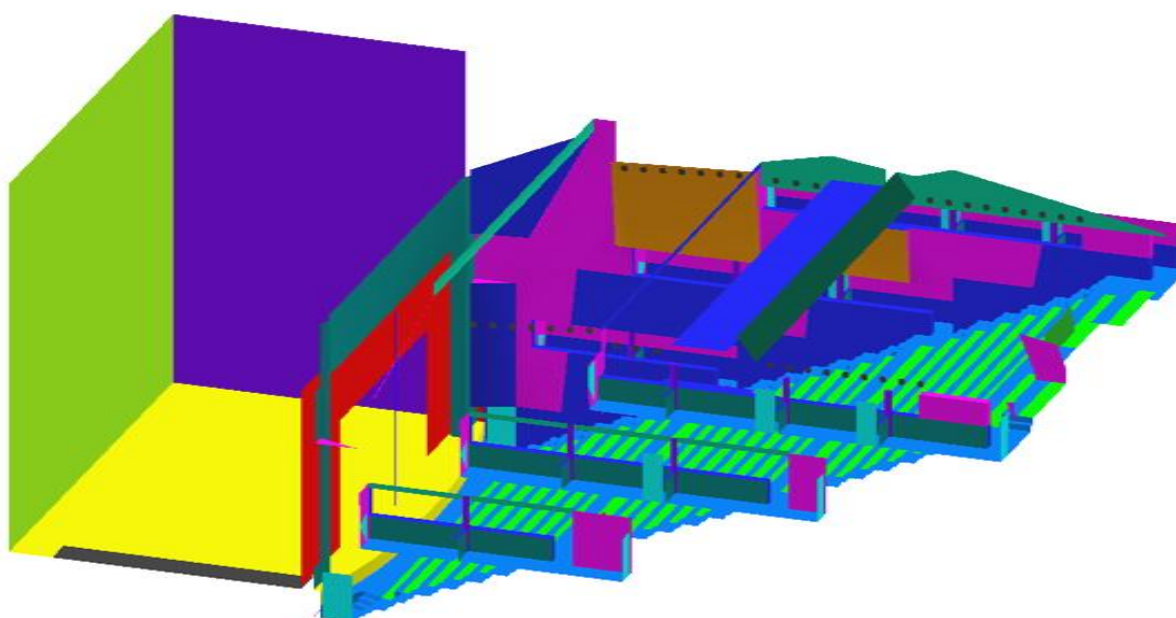


Figura 78. Vista exterior de la asignación de color a materiales.

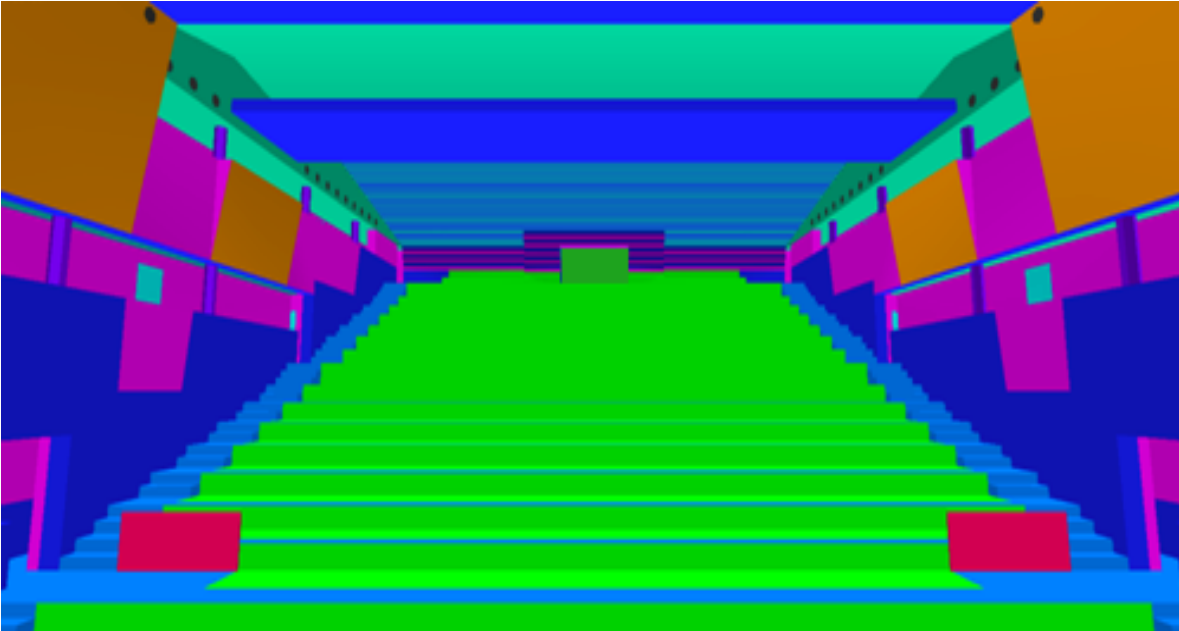


Figura 79. Vista interior de asignación de materiales desde el escenario.

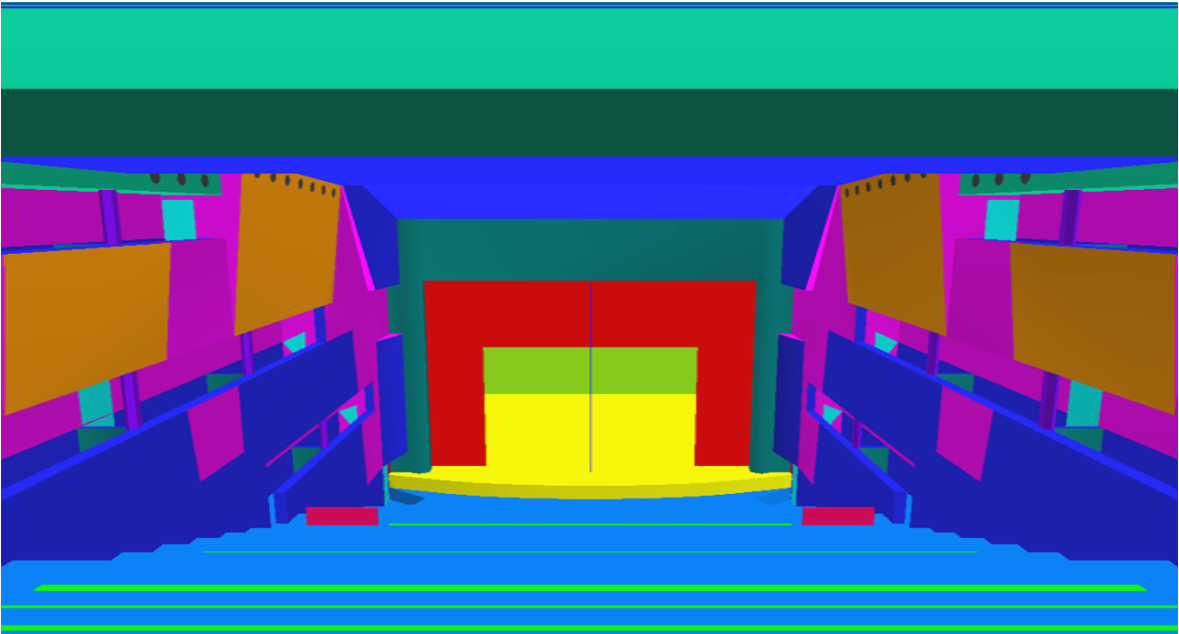


Figura 80. Vista interior de asignación de materiales desde la sala de control.

Parquet	Hormigón	Pladur
Butacas	Telón	Panel perforado
Ladrillo pintado	Tarima de madera	Panel Acustisón 50-A
Moqueta de pared	Madera barnizada	Vidrio
Panel DIN	Conductos de ventilación	Puertas

Tabla 20. Código de color de asignación de materiales del modelo acústico.



7.3 Asignación de texturas

Con el objetivo de obtener una representación más realista del recinto se recurre al texturizado de las superficies. Para ello EASE permite generar texturas e incluirlas en la base de datos del proyecto para asignarlas a cada una de las superficies, pudiéndose mostrar imágenes que podrían parecer una fotografía del recinto real.

Como ejemplo, a continuación se muestran una serie de fotografías reales del teatro, que comparadas con las imágenes obtenidas en el modelo texturizado obtenido desde el módulo Visión de EASE representan la similitud entre el diseño y la realidad.

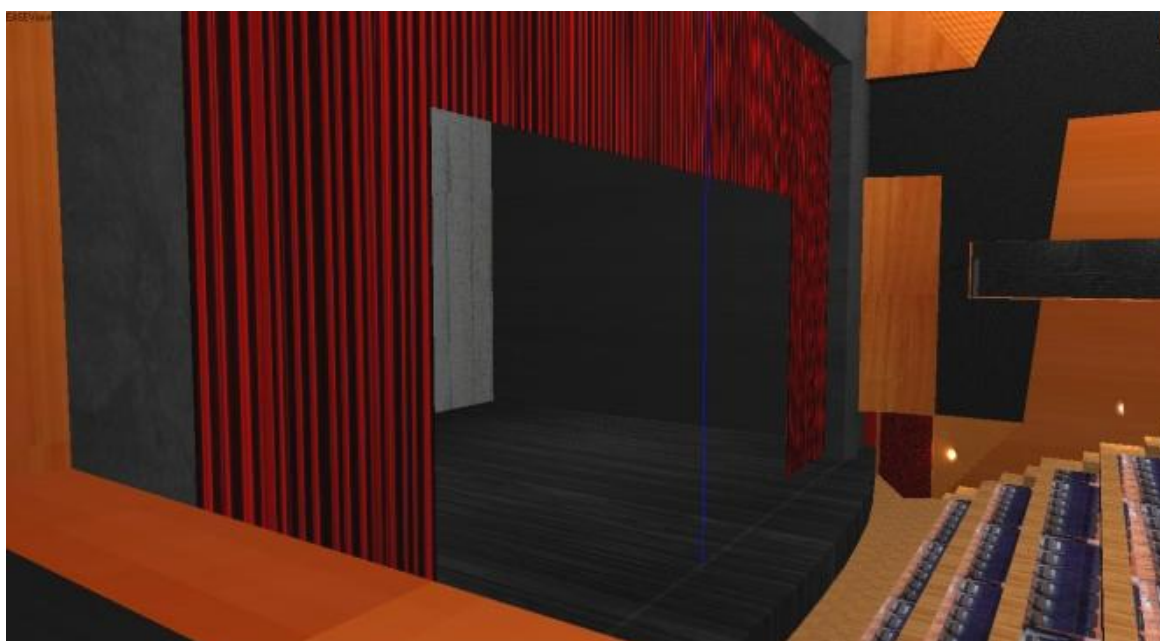


Figura 81. Imagen real y modelo texturizado desde primer palco.



Figura 82. Imagen real y modelo texturizado desde palco superior.



Figura 83. Imagen real y modelo texturizado desde cabina técnica.

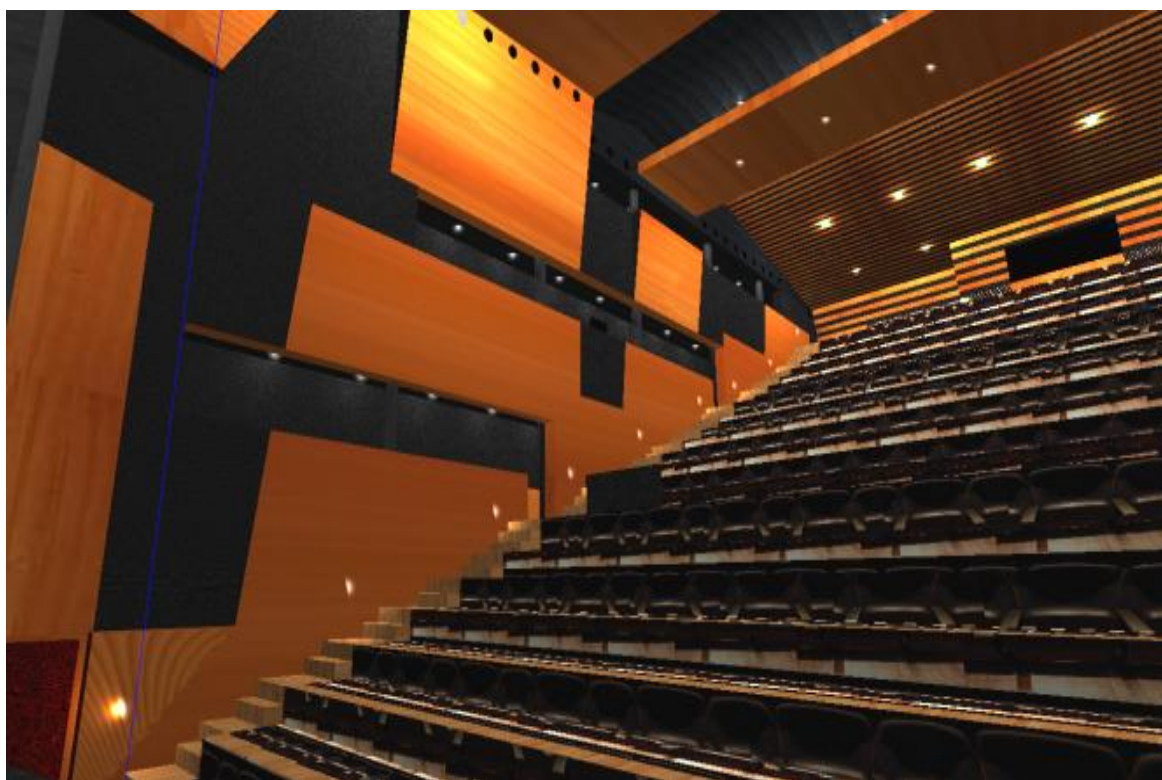


Figura 84. Imagen real y modelo texturizado desde el escenario.

7.4 Asignación de áreas de audiencia

Con el fin de poder realizar la simulación de los parámetros acústicos del modelo diseñado de una forma global, se definen una serie de áreas de audiencia distribuidas a lo largo las zonas del teatro en las que se situará el público, como son el patio de butacas y los palcos.

A su vez, estas áreas de audiencia son planos situados a una distancia del suelo que se considera la posición media de altura de la cabeza de los oyentes sentados, sobre las que el programa proporcionará un mapeado de color en función del parámetro acústico a calcular, de forma que se pueda hacer una rápida idea del comportamiento acústico de la sala. Para el estudio genérico de estos parámetros, en el modelo acústico del teatro se definen 11 áreas de audiencia de las cuales 5 pertenecen al patio de butacas y 6 a los palcos.

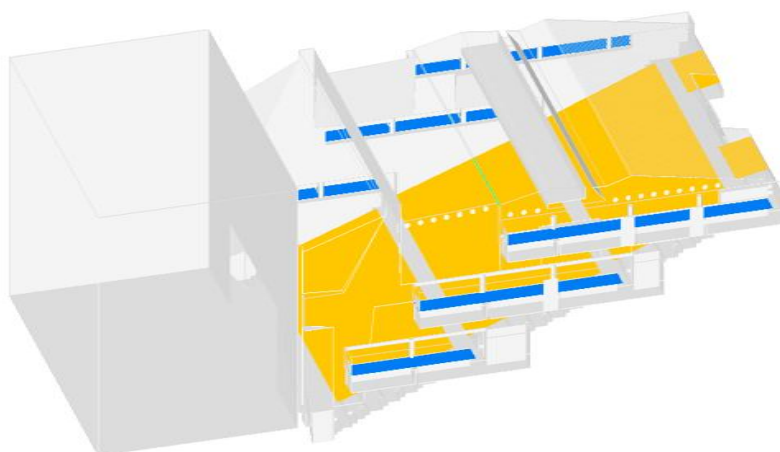


Figura 85. Distribución de las áreas de audiencia sobre el modelo acústico del teatro.

Como se puede observar en la figura 85, las áreas de audiencia pertenecientes a los palcos se superponen una sobre otra y se diferencian de las que pertenecen al patio de butacas en una variación de color para su rápida interpretación. Para facilitar la visualización del mapeado en dos dimensiones, las áreas de audiencia pertenecientes a los palcos se han desplazado para evitar su superposición tal y como se muestra en la figura 86.

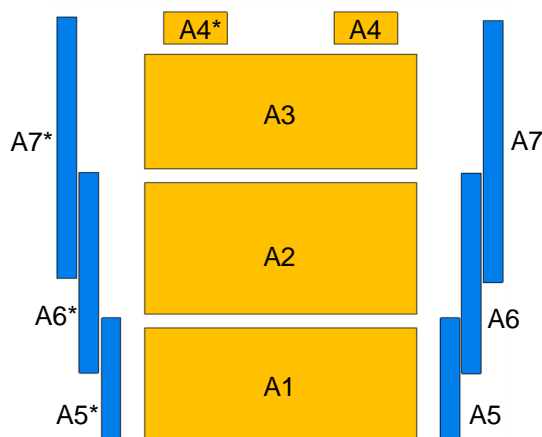


Figura 86. Áreas de audiencia sobre el modelo acústico para el mapeado en 2D.

CAPÍTULO VIII



SIMULACIÓN DE MAGNITUDES ACÚSTICAS



8. SIMULACIÓN DE MAGNITUDES ACÚSTICAS

Una vez realizado el diseño del modelo acústico del teatro, asignados los materiales a las distintas superficies y definidas las áreas de audiencia, se procede al cálculo de los parámetros acústicos del recinto mediante los diferentes módulos que proporciona EASE.

El objetivo principal es la predicción de los parámetros acústicos, para ello se analiza la sala cuando se encuentra vacía y para condiciones de ocupación del 90% sustituyendo el coeficiente de absorción de las butacas cuando se encuentran con público. La simulación de las magnitudes acústicas varía desde el cálculo global obtenido mediante el módulo de proyecciones *Area Mapping*, hasta la puntualización de las diferentes medidas a realizar en los diferentes puntos de audiencia a través del módulo *Probe*.

8.1 Tiempo de reverberación

A partir de los datos de absorción incluidos en el modelo informático se obtiene el valor del tiempo de reverberación simulado, teniendo en cuenta la modificación de los coeficientes de absorción de los materiales empleados, sin superar una variación del 10 %, e introduciendo para su cálculo los valores de humedad relativa, temperatura y presión obtenidos en el momento de la realización de las medidas *in situ*, definidos anteriormente en el apartado 6.1.1 del Capítulo VI, para obtener la mínima desviación con la realidad.

f [Hz]	T _{Sabine} sala vacía	T _{Sabine} sala ocupada
100	1,28	1,27
125	1,62	1,53
160	1,53	1,41
200	1,40	1,28
250	1,28	1,16
315	1,22	1,11
400	1,13	1,03
500	1,08	0,99
630	1,10	1,00
800	1,10	0,99
1000	1,14	1,02
1250	1,14	1,02
1600	1,18	1,05
2000	1,17	1,05
2500	1,15	1,04
3150	1,15	1,05
4000	1,10	1,03
5000	1,00	0,95

Tabla 21. Valores de T obtenido en EASE Sabine para sala vacía y ocupada.





Además de obtener el cálculo del tiempo de reverberación a través del módulo *Edit*, EASE permite simular mediante su módulo de trazado de rayos las diferentes trayectorias recorridas por los rayos que salen desde la fuente emisora hasta los puntos de medida e invocar el resultado de la simulación a través del módulo *Probe* que permite calcular la integral de Schroeder a partir del reflectograma obtenido. Esta opción captura todos los rayos que pasen a través de una esfera de radio 1 m que rodea cada asiento y almacena el resultado en un archivo de impacto [19].

El método de Schroeder determina el tiempo de reverberación a base de integrar las contribuciones energéticas marcados los límites de integración que indican el comienzo de la caída de los niveles y comienzo de la zona donde los pulsos se van separando, aproximadamente comienzo y fin de la reverberación.

Para la simulación se han establecido las mismas condiciones definidas en el apartado 6.1.1 correspondiente al Capítulo VI, realizando las medidas en cada uno de los 12 puntos de las zonas de audiencia y para dos posiciones de la fuente emisora (F_1 y F_2) para ambas condiciones de ocupación de la sala. Los parámetros introducidos para el cálculo del tiempo de reverberación por el método de Schroeder han sido un orden de reflexión de 10, un tiempo de medida de 1200 ms y una cantidad de rayos por altavoz ajustada de forma que la probabilidad de impacto sea del 100%.

Una vez realizadas las medidas se genera un ecograma que muestra la llegada de las múltiples reflexiones dentro de los primeros 1200 ms y se determina el tiempo de reverberación por Schroeder que evalúa la caída del nivel de presión sonora a partir de los límites de integración establecidos para cada una de las medidas que realiza el software.

A continuación se muestra un ejemplo representativo de evaluación de la caída del nivel de presión sonora en función de la llegada de las reflexiones a un punto de medida mediante el método de Schroeder.

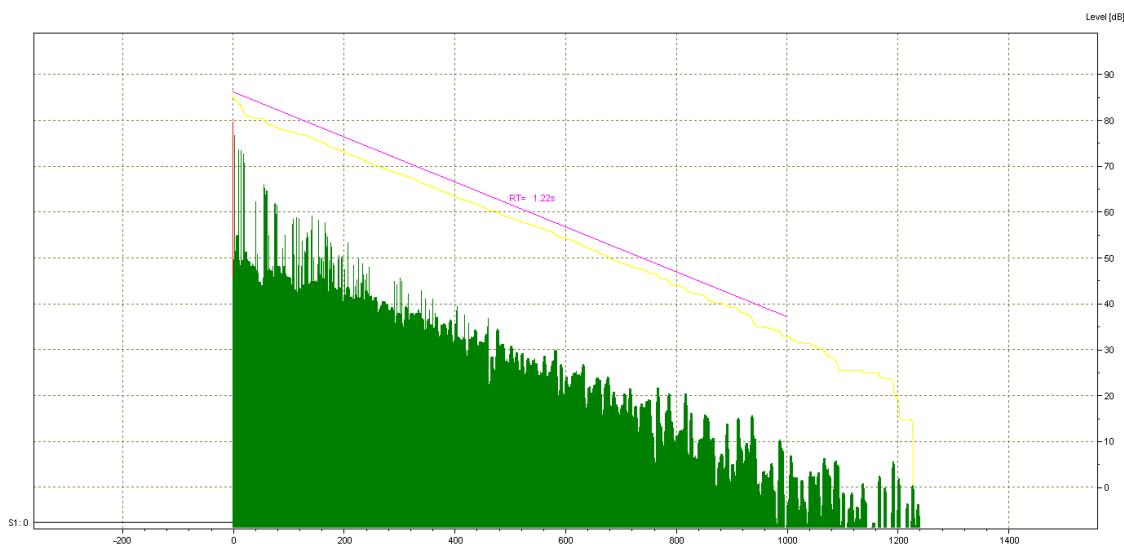


Figura 87. Ecograma representativo de T calculado por Schroeder.



f [Hz]	T _{P1}	T _{P2}	T _{P3}	T _{P4}	T _{P5}	T _{P6}	T _{P7}	T _{P8}	T _{P9}	T _{P10}	T _{P11}	T _{P12}	T _v	σ _v
100	1,52	1,53	1,52	1,51	1,52	1,51	1,51	1,53	1,57	1,48	1,39	1,44	1,50	0,05
125	1,94	1,84	1,82	1,82	1,76	1,81	1,86	1,78	1,81	1,85	1,73	1,82	1,82	0,05
160	1,62	1,59	1,62	1,60	1,54	1,64	1,56	1,58	1,66	1,51	1,57	1,63	1,59	0,04
200	1,49	1,49	1,45	1,42	1,49	1,48	1,48	1,49	1,43	1,33	1,38	1,45	1,45	0,05
250	1,42	1,34	1,38	1,43	1,26	1,38	1,45	1,33	1,35	1,34	1,26	1,38	1,36	0,06
315	1,18	1,30	1,42	1,27	1,31	1,37	1,20	1,34	1,29	1,34	1,41	1,38	1,32	0,08
400	1,19	1,21	1,23	1,22	1,24	1,11	1,16	1,12	1,18	1,10	1,07	1,26	1,17	0,06
500	1,16	1,17	1,17	1,25	1,18	1,16	1,08	1,39	1,17	1,09	1,18	1,14	1,18	0,08
630	1,15	1,29	1,07	1,08	1,17	1,16	1,26	1,17	1,29	1,12	1,08	1,24	1,17	0,08
800	1,12	1,39	1,15	1,17	1,20	1,28	1,20	1,18	1,11	1,30	1,08	1,08	1,19	0,09
1000	1,17	1,23	1,16	1,21	1,23	1,23	1,20	1,24	1,17	1,28	1,19	1,22	1,21	0,03
1250	1,20	1,16	1,14	1,14	1,17	1,20	1,31	1,15	1,17	1,14	1,17	1,20	1,18	0,05
1600	1,09	1,14	1,18	1,15	1,14	1,16	1,10	1,27	1,08	1,11	1,17	1,09	1,14	0,05
2000	1,15	1,19	1,15	1,15	1,12	1,16	1,09	1,17	1,12	1,09	1,02	1,07	1,12	0,05
2500	1,08	1,08	1,11	1,10	1,08	1,02	1,16	1,14	1,01	1,03	1,03	1,03	1,07	0,05
3150	1,18	1,03	1,06	1,20	1,02	1,08	0,99	1,07	0,98	1,01	1,07	1,06	1,06	0,07
4000	1,00	1,00	0,96	0,98	1,00	1,01	1,01	1,08	0,98	0,96	0,98	0,94	0,99	0,04
5000	0,89	0,92	0,87	0,90	0,93	0,92	0,91	0,89	0,84	0,85	0,89	0,84	0,89	0,03

Tabla 22. T calculado por Schroeder medido cuando la sala está vacía.

f [Hz]	T _{P1}	T _{P2}	T _{P3}	T _{P4}	T _{P5}	T _{P6}	T _{P7}	T _{P8}	T _{P9}	T _{P10}	T _{P11}	T _{P12}	T _o	σ _o
100	1,48	1,56	1,44	1,52	1,48	1,51	1,44	1,46	1,49	1,40	1,61	1,34	1,48	0,07
125	1,82	1,81	1,79	1,79	1,73	1,75	1,77	1,73	1,66	1,80	1,77	1,69	1,76	0,05
160	1,61	1,66	1,59	1,49	1,55	1,55	1,53	1,50	1,47	1,42	1,54	1,45	1,53	0,07
200	1,53	1,34	1,28	1,32	1,35	1,37	1,33	1,41	1,31	1,46	1,42	1,27	1,37	0,08
250	1,34	1,37	1,21	1,15	1,38	1,30	1,25	1,24	1,34	1,15	1,10	1,23	1,26	0,09
315	1,12	1,34	1,25	1,09	1,20	1,10	1,20	1,10	1,12	1,07	1,15	1,14	1,16	0,08
400	1,03	1,01	1,24	1,07	1,01	1,16	1,41	1,06	1,18	0,94	1,12	0,92	1,10	0,14
500	1,00	1,09	1,06	1,06	1,06	1,13	1,01	1,15	1,09	1,08	1,08	0,93	1,06	0,06
630	1,07	1,00	0,99	1,08	1,00	1,04	1,02	0,98	0,91	0,97	0,94	1,02	1,00	0,05
800	1,08	0,99	1,14	1,17	1,14	1,00	1,03	1,03	0,99	0,93	0,98	0,98	1,04	0,08
1000	1,00	0,99	1,20	1,07	0,99	1,10	0,91	1,53	1,12	0,93	1,11	0,96	1,08	0,17
1250	1,52	1,32	1,16	0,95	0,95	0,95	0,86	1,04	0,99	1,05	0,96	0,91	1,06	0,19
1600	0,95	0,95	1,03	1,01	0,96	1,17	1,08	1,00	0,96	1,01	0,96	1,01	1,01	0,06
2000	1,23	1,12	0,95	0,99	1,07	0,99	1,06	0,95	1,00	0,96	1,23	0,96	1,04	0,10
2500	0,94	0,96	0,95	1,06	0,96	1,01	1,01	0,92	1,18	1,22	1,05	0,97	1,02	0,10
3150	1,01	0,91	1,03	0,94	1,07	1,16	1,00	0,96	1,02	0,89	0,94	0,99	0,99	0,07
4000	0,96	0,93	0,96	0,89	0,93	0,95	0,94	0,90	0,89	0,89	1,02	0,88	0,93	0,04
5000	0,82	0,84	0,77	0,89	0,84	0,94	0,80	0,79	0,80	0,86	0,85	1,04	0,85	0,07

Tabla 23. T calculado por Schroeder medido cuando la sala está ocupada.





Calculado el tiempo de reverberación medio en función de la posición de la fuente en el escenario por el método de Schroeder (T_{F1} y T_{F2}) se realiza la media para obtener el tiempo de reverberación global calculado por Schroeder mostrándose en las tablas 22 y 23 el resultado para ambas condiciones de ocupación de la sala.

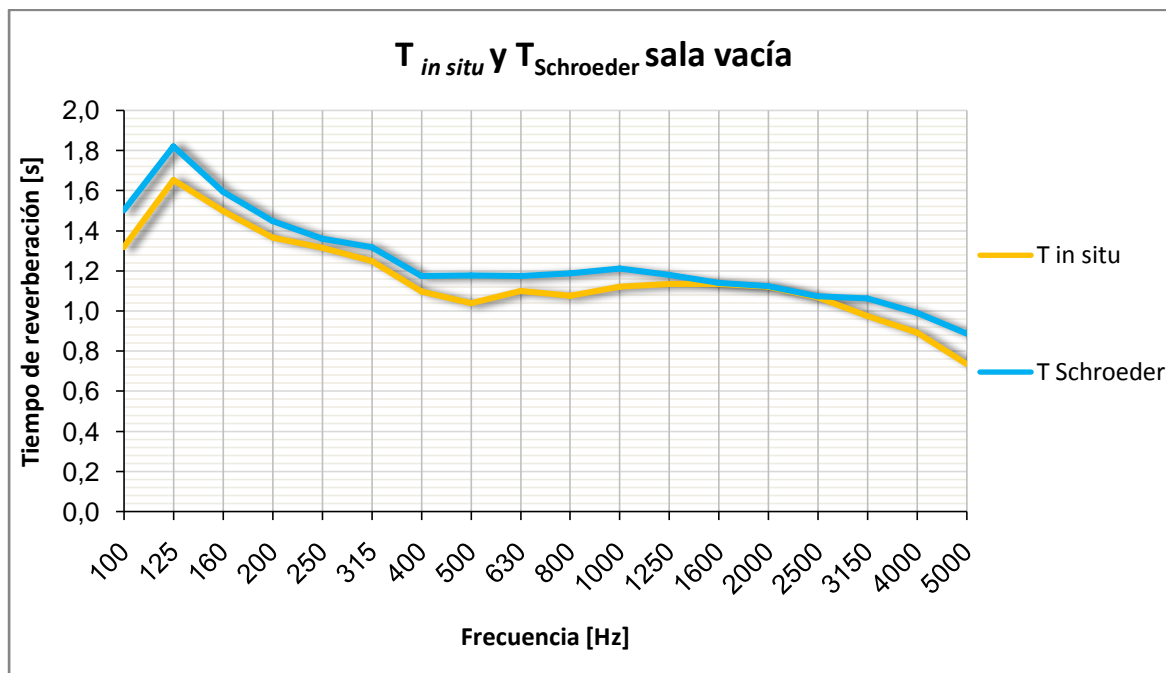


Figura 88. Comparativa de tiempo de reverberación medido *in situ* y por Schroeder.

En la figura 88 se puede apreciar la similitud entre el tiempo de reverberación medido *in situ* y el que proporciona el modelo informático tras la simulación en las mismas condiciones, lo cual aporta una idea de la aproximación del modelo diseñado a la realidad.

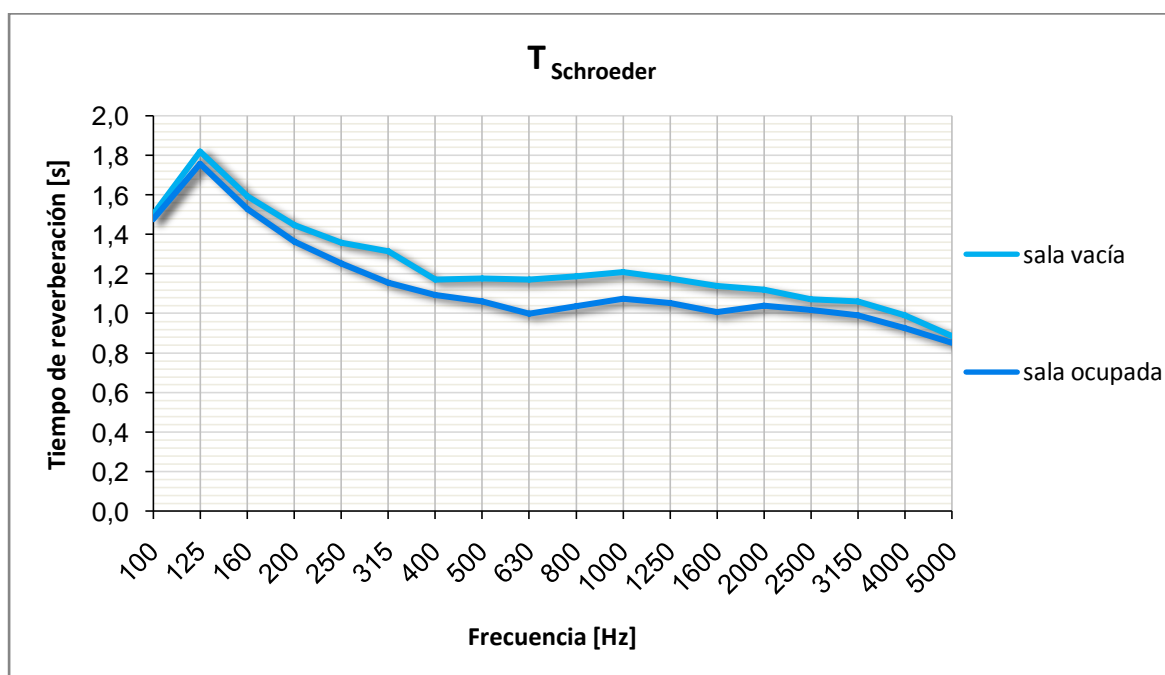


Figura 89. Comparativa de tiempo de reverberación calculado por Schroeder.



El tiempo de reverberación calculado por Schroeder refleja una medida más precisa que varía en función del punto de medida elegido ya que se basa en la disminución de los niveles proyectados por el programa. Sin embargo, Sabine y Eyring representan un cálculo generalizado produciendo un único valor de tiempo de reverberación para la sala.

Observando la figura 89, el tiempo de reverberación medido por Schroeder cuando la sala se encuentra ocupada posee una disminución respecto del tiempo obtenido cuando la sala se encuentra vacía debido al aumento de la absorción.

Teniendo en cuenta que el resultado obtenido por el método Schroeder es más aproximado a un caso real, se analiza el promedio resultante entre las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz calculado por Schroeder para ambas condiciones de ocupación obteniendo un $T_{\text{mid}} = 1,20$ s cuando la sala se encuentra vacía y $T_{\text{mid}} = 1,07$ s cuando la sala se encuentra ocupada, siendo ambos resultados adecuados para el uso de la palabra en el recinto aproximándose al límite inferior establecido para la música cuando la sala se encuentra vacía.

8.2 Tiempo de caída inicial EDT

En la simulación se establecen condiciones de ensayo planteadas para un caso real, mediante el módulo de proyección *Area Mapping* y utilizando la herramienta de análisis acústicos de recintos *Aura*¹¹. Para ello se introduce en el modelo informático una fuente sonora omnidireccional de 100 W de potencia que radie un nivel de presión sonora de 110 dB, situada en el eje del escenario a una profundidad de 1 m y a una altura de 1,5 m.

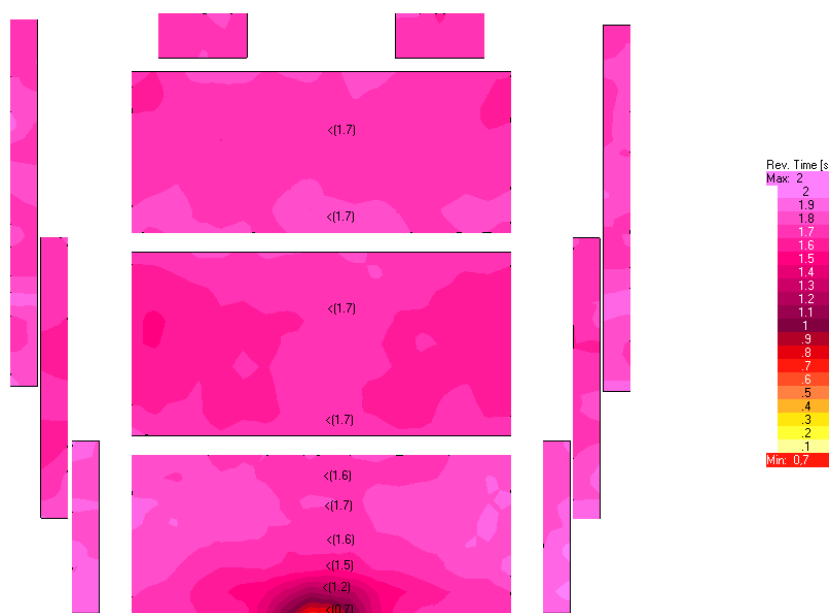


Figura 90. EDT para 125 Hz.

¹¹ AURA (Analysis Utility for Room Acoustic), herramienta que utiliza los algoritmos CAESAR desarrollados por la Universidad Alemana de Aachen que reducen el tiempo del cálculo requerido y permiten estudios basados en la reflexión abarcando la respuesta al impulso completa.



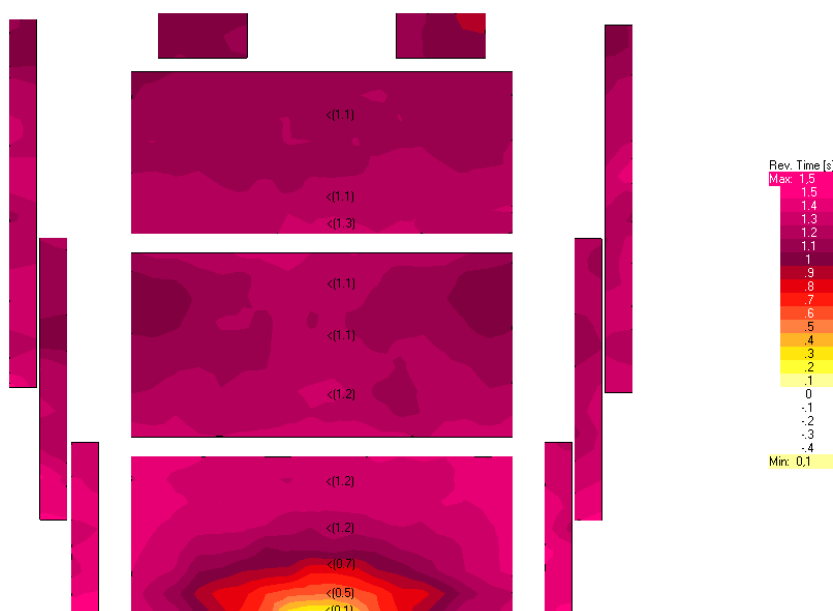


Figura 91. EDT para 1000 Hz.

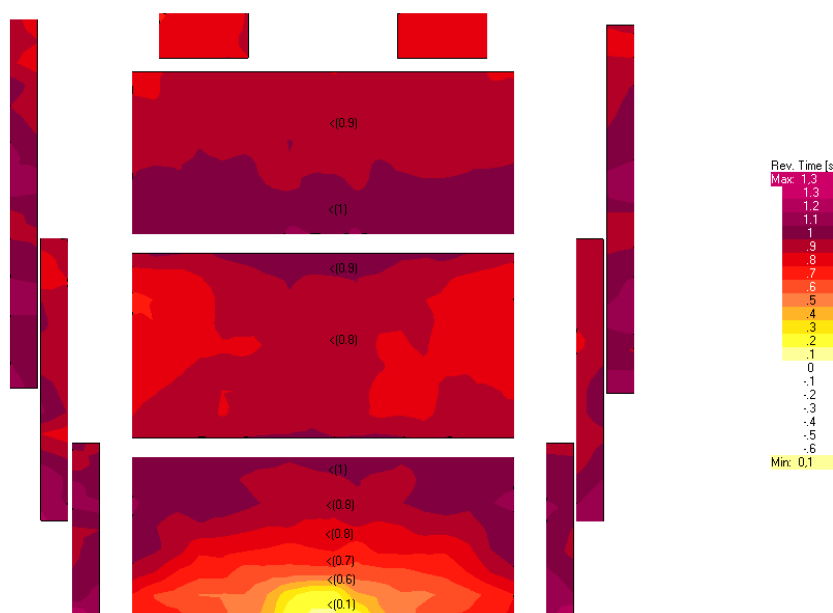


Figura 92. EDT para 5000 Hz.

En la proyección del parámetro EDT sobre las áreas de audiencia mostradas en las anteriores figuras se puede apreciar cómo conforme aumenta la frecuencia a analizar disminuye el tiempo de caída inicial.

Para ello en las siguientes figuras 93 y 94 se muestra el espectro del tiempo de reverberación medido *in situ* y el promedio de los valores de EDT obtenidos en la simulación cuando la sala se encuentra vacía, y la posterior comparación de estos valores cuando la sala se encuentra ocupada al 90 %.

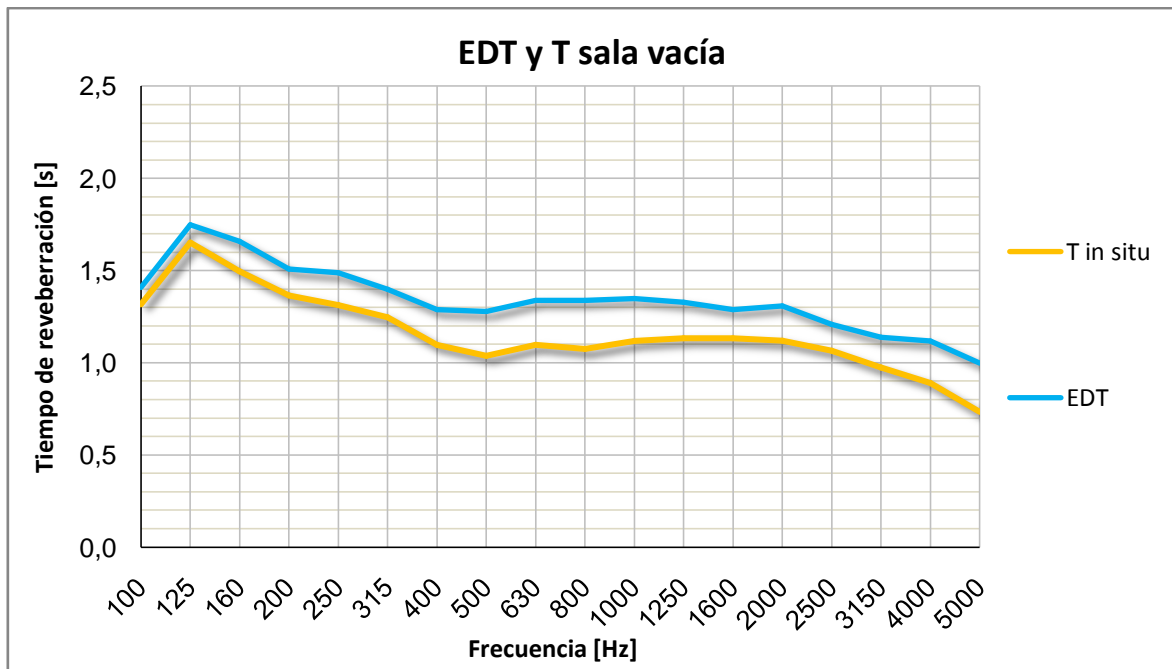


Figura 93. EDT simulado y T medido *in situ*.

El parámetro EDT con la sala vacía predomina sobre el tiempo de reverberación medido *in situ*, significando la existencia de una mayor presencia del campo directo y de las primeras reflexiones lo cual implica una mayor definición de los sonidos a baja frecuencia y en alta cuando la sala está ocupada.

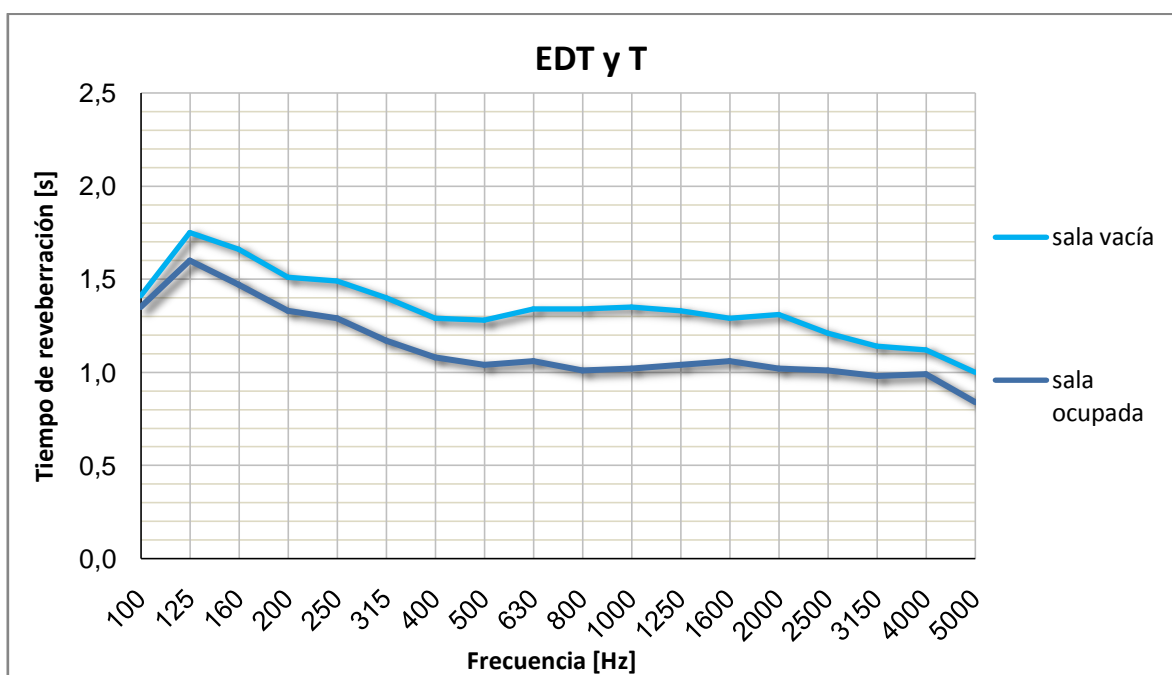


Figura 94. EDT simulado para sala vacía y ocupada.

De la misma forma que ocurría con T medido anteriormente, el parámetro EDT disminuye debido al aumento de la absorción que experimenta la sala cuando está ocupada.





8.3 Nivel de presión sonora directo

Con las mismas condiciones de medida expuestas anteriormente, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la simulación del parámetro L_p directo mediante el módulo de proyecciones *Aura* del cual se extraen la mayoría de las medidas simuladas en los cálculos básicos más un número de medidas acústicas estandarizadas que dan un resultado más detallado de la acústica y del funcionamiento.

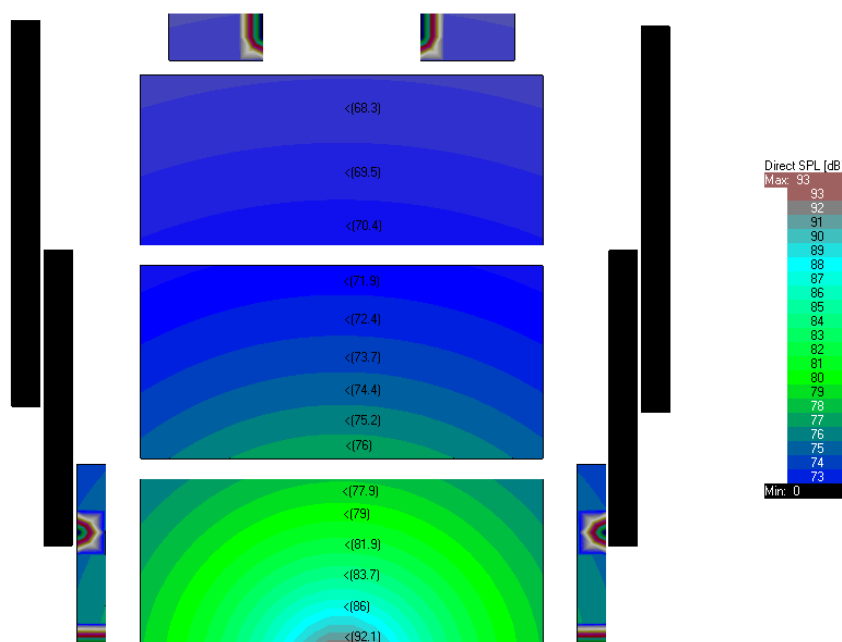


Figura 95. L_p directo para 125 Hz.

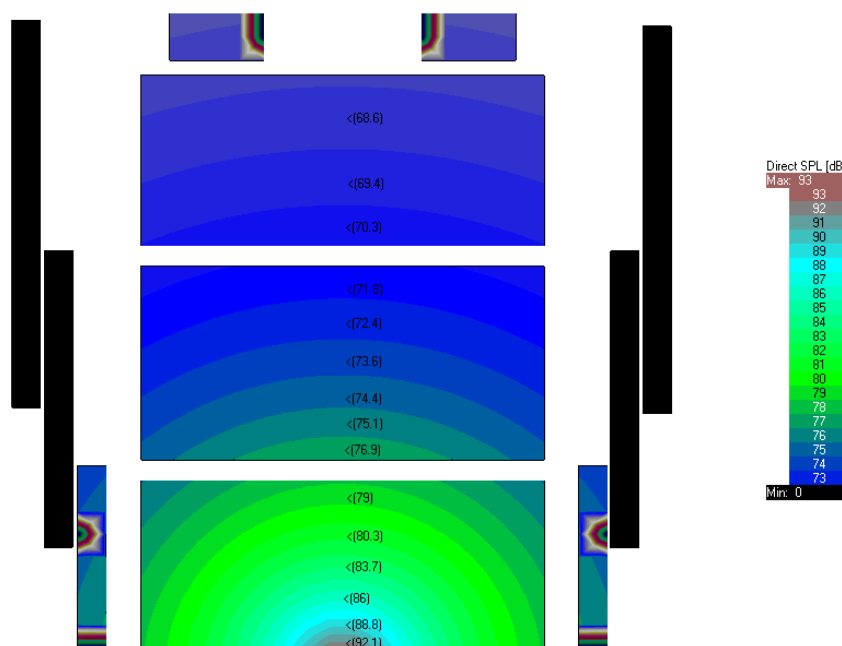


Figura 96. L_p directo para 1000 Hz.

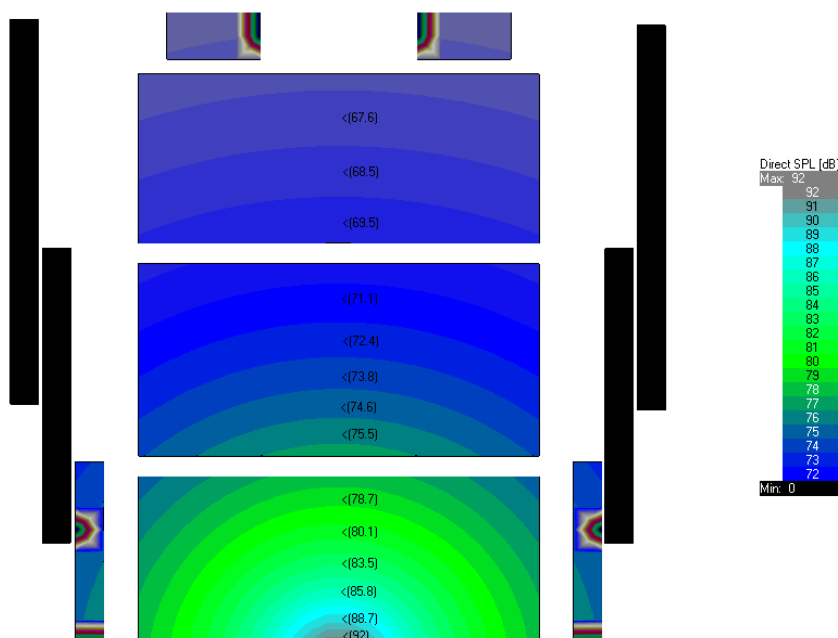


Figura 97. L_p directo para 5000 Hz.

Los niveles más altos se obtienen en los puntos más cercanos a la fuente. Además, cabe destacar la nula incidencia directa sobre los palcos pertenecientes a la segunda y tercera planta, ya que la influencia del sonido se debe a las sucesivas reflexiones que lleguen tras el sonido directo, lo que implica una alta desviación entre niveles máximos y mínimos.

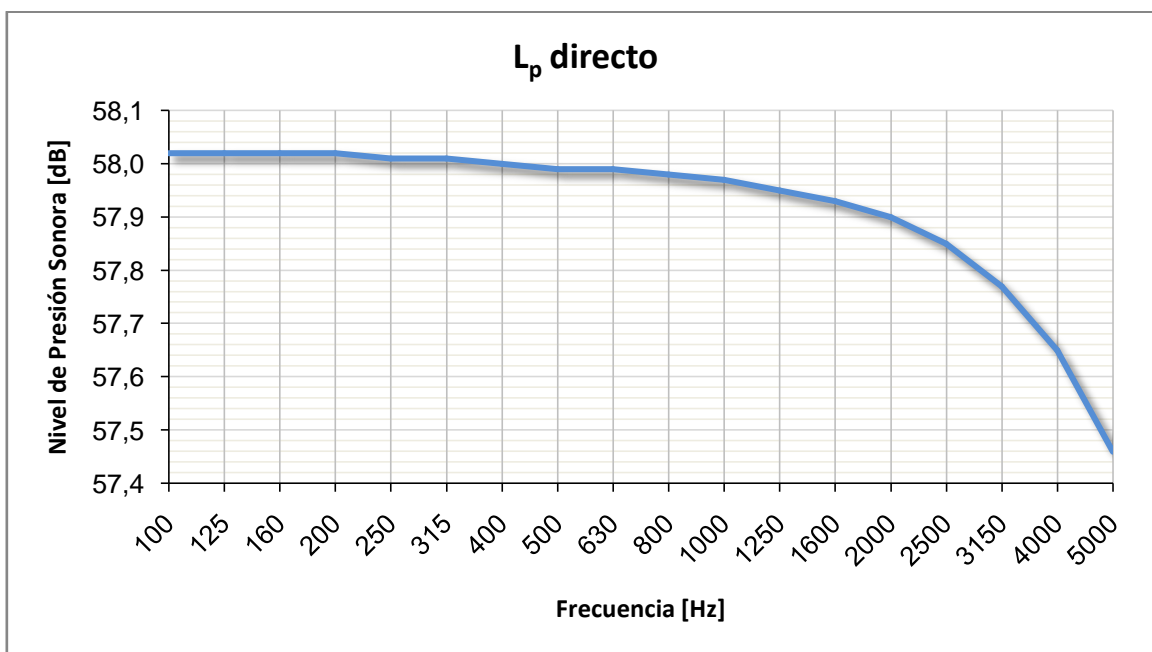


Figura 98. Espectro de L_p directo medio para una fuente de potencia 100 W.

Según la figura 98, la diferencia existente entre las frecuencias analizadas es apenas apreciable, ya que la radiación de la fuente es la misma para todas las frecuencias. Además, conforme aumenta la frecuencia analizada se aprecia la disminución del nivel de presión sonora debido a la mayor presencia de absorción por parte del aire a altas frecuencias.





8.4 Nivel de presión sonora total

Estableciendo las mismas condiciones de simulación expuestas anteriormente, a continuación se muestra la suma total del sonido directo y reverberante sobre las áreas de audiencia del recinto mediante el módulo de proyecciones, de forma que aprecie la aportación del recinto en la amplificación del sonido, pudiendo apreciar como disminuye el valor del nivel de presión sonora total en el recinto conforme aumente la frecuencia y la distancia a la fuente.

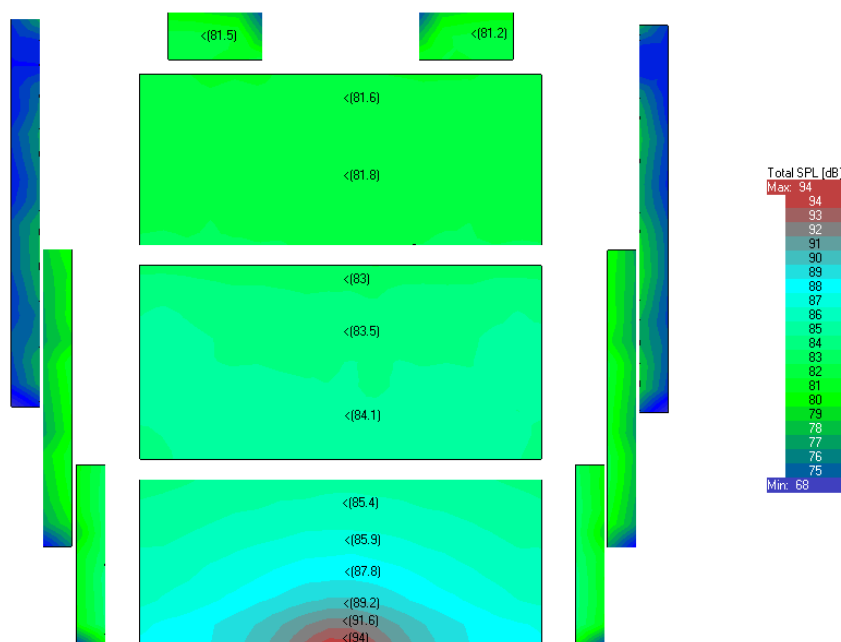


Figura 99. Lp total para 125 Hz.

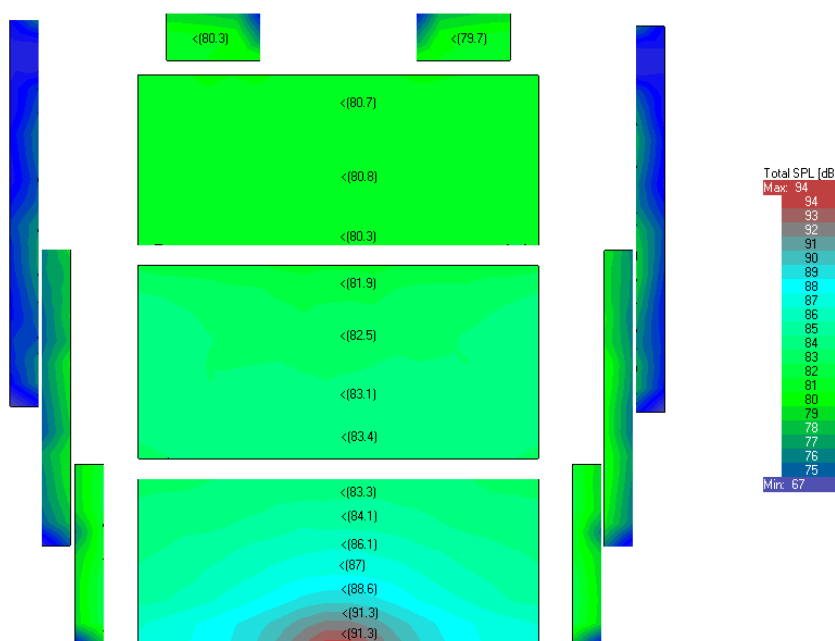


Figura 100. Lp total para 1000 Hz.

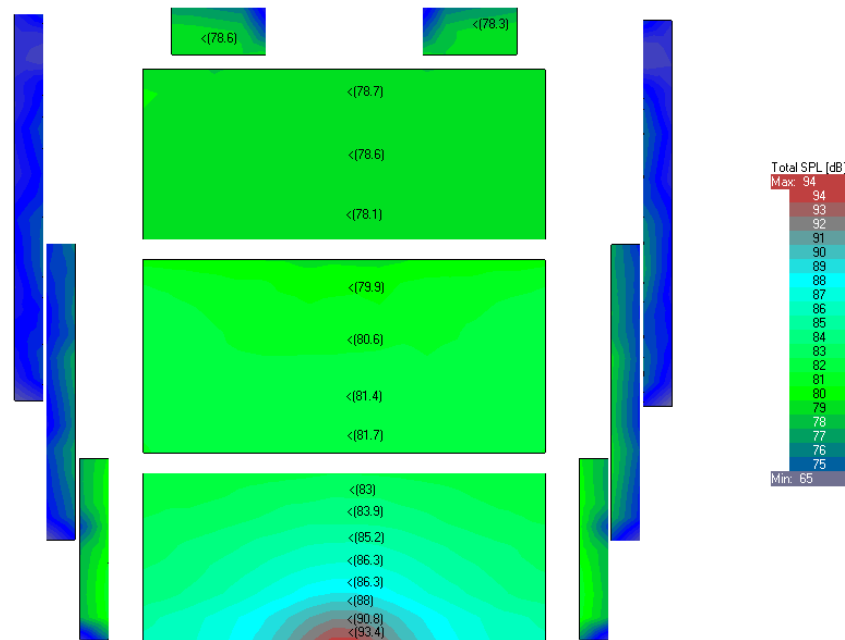


Figura 101. L_p total para 5000 Hz.

Debido a la cercanía de la fuente a las primeras butacas se aprecia una alta variación entre los niveles máximos y mínimos, traduciéndose en una alta influencia del campo directo en esa zona. Eliminando este efecto, la diferencia real entre el campo directo y reverberante disminuye. Además, para la evaluación de la amplificación que produce el recinto en un caso real se ha sustituido la potente fuente sonora inicial por la voz de una mujer.

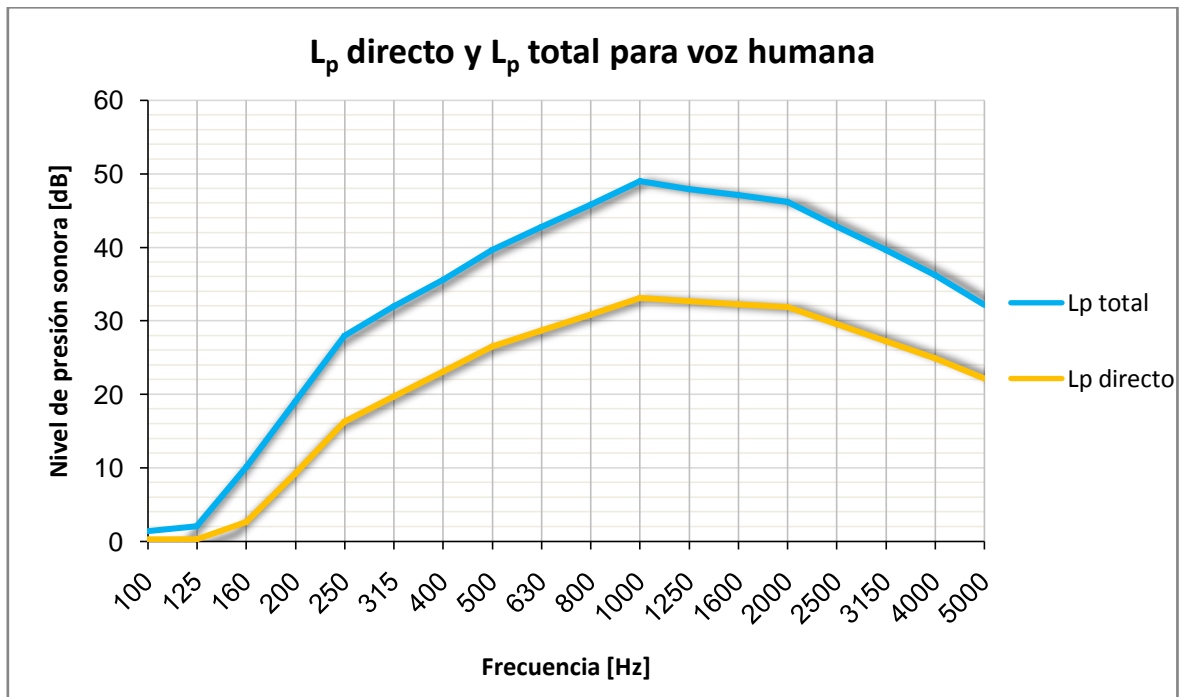


Figura 102. L_p directo y total para voz humana emitiendo.

Como se puede apreciar en la figura 102 la ganancia que proporciona el recinto ante un caso real, ya que el recinto se destina principalmente a este uso.





8.5 Pérdida de articulación de las consonantes

Para el caso de los parámetros relacionados con la inteligibilidad, las condiciones de ensayo empleadas para la simulación varían respecto de las características de la fuente emisora, empleando una voz humana con un alto nivel, en este caso la voz de una mujer.

Para ello se muestra el resultado de la simulación del parámetro ALCons y su distribución porcentual en la proyección del mapa obtenido cuando la sala se encuentra vacía.

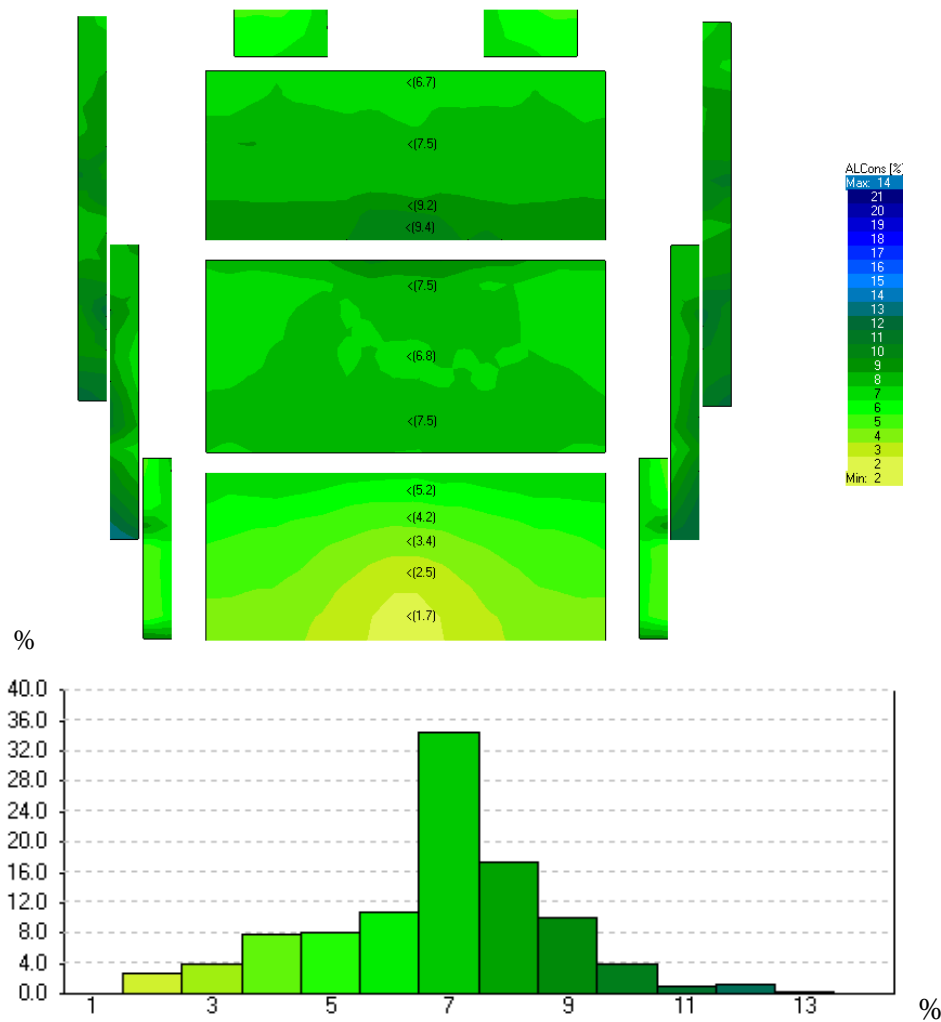


Figura 103. Valores de ALCons en las áreas de audiencia con sala vacía.

ALCons %	Valoración
0 % - 3 %	Excelente
3 % - 7 %	Muy buena
7 % - 12 %	Buena
12 % - 15 %	Regular
15 % - 18 %	Pobre
> 18 %	Inaceptable

En la figura 103 el valor de ALCons en las áreas de audiencia con la sala vacía posee una inteligibilidad que varía entre el 1,66 % y 9,4 % calificada desde excelente a buena, empeorando en puntos más alejados de la fuente. Sin embargo, la inteligibilidad presente en los palcos laterales llega a alcanzar el valor de 13,09 %. Teniendo en cuenta que la media obtenida es ALCons = 6,81 %, se puede obtener una valoración final calificada como muy buena.

Tabla 24. ALCons sala vacía.



Con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos en la simulación de los parámetros para las condiciones de ocupación de la sala definidas anteriormente, una vez analizados los resultados tras la simulación del parámetro ALCons con la sala vacía se muestran los resultados obtenidos al simular la sala con una ocupación del 90 % siendo las características de la fuente emisora la voz humana para acercarse al caso real.

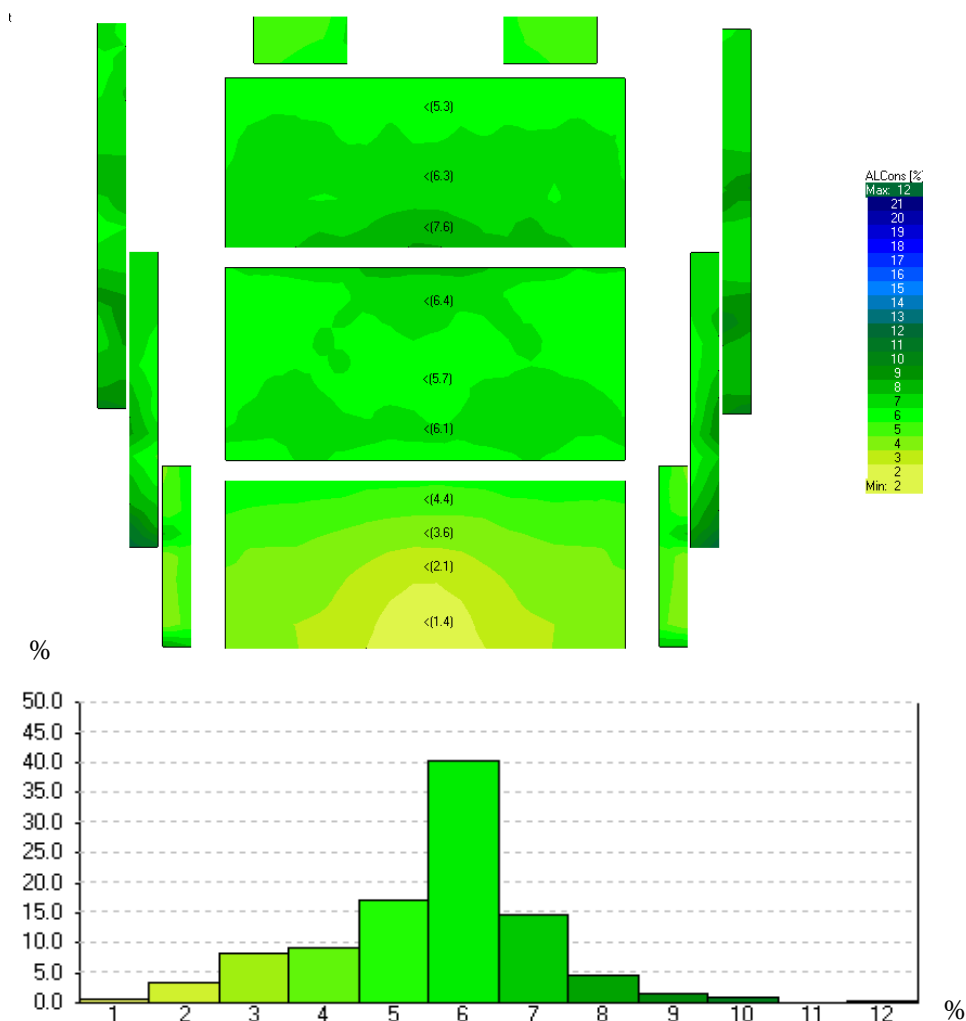


Figura 104. Valores de ALCons en las áreas de audiencia con la sala ocupada.

ALCons %	Valoración
0 % - 3 %	Excelente
3 % - 7 %	Muy buena
7 % - 12 %	Buena
12 % - 15 %	Regular
15 % - 18 %	Pobre
> 18 %	Inaceptable

En la figura 104 se puede apreciar como disminuye el valor medio de ALCons respecto de la sala vacía obteniendo ALCons = 5,62 %. El intervalo que comprende este resultado posee una valoración muy buena llegando a alcanzar el peor resultado (11,95 %) en los palcos. Por tanto, la valoración final del parámetro ALCons es calificada como muy buena para ambas condiciones de ocupación de la sala, mejorando cuando se encuentra ocupada por al aumento de la absorción.

Tabla 25. ALCons sala ocupada.





8.6 Índice de inteligibilidad de la palabra

Para el cálculo de la inteligibilidad mediante el índice RASTI se utiliza una fuente de voz humana, en este caso el de un mujer, del mismo modo que se empleó para la simulación del índice ALCons.

Para ello, a continuación se representa el resultado de la simulación del parámetro RASTI y su distribución porcentual en la proyección del mapa obtenido.

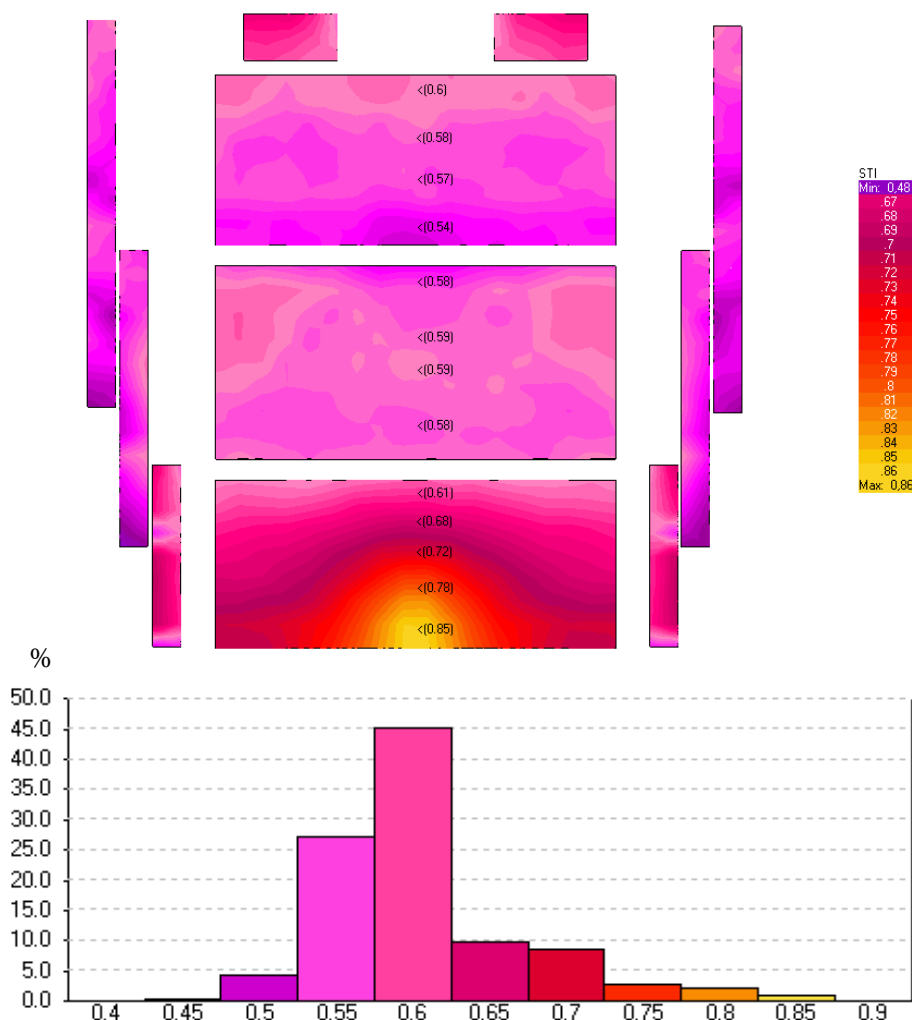


Figura 105. Valores de RASTI en las áreas de audiencia con la sala vacía.

STI / RASTI	Valoración
0,75 – 1,00	Excelente
0,60 – 0,75	Muy buena
0,45 – 0,60	Buena
0,30 – 0,45	Regular
0,25 – 0,30	Pobre
0,00 – 0,25	Inaceptable

Tabla 26. RASTI sala vacía.

Como se puede apreciar en la figura 105 los valores de inteligibilidad varían desde un valor mínimo de 0,48 hasta un valor máximo de 0,86 por lo que se califica de muy buena a excelente, mejorando estos resultados en las zonas más próximas al escenario y viéndose reducidas en las áreas pertenecientes a los palcos. Teniendo en cuenta que el valor medio obtenido es $RASTI = 0,60$ la valoración final de la inteligibilidad del recinto vacío se califica como muy buena.



Con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos en la simulación de los parámetros para las condiciones de ocupación de la sala definidas anteriormente, una vez analizados los resultados tras la simulación del parámetro RASTI con la sala vacía se muestran los resultados obtenidos al simular la sala con una ocupación del 90 % tal y como se muestran a continuación.

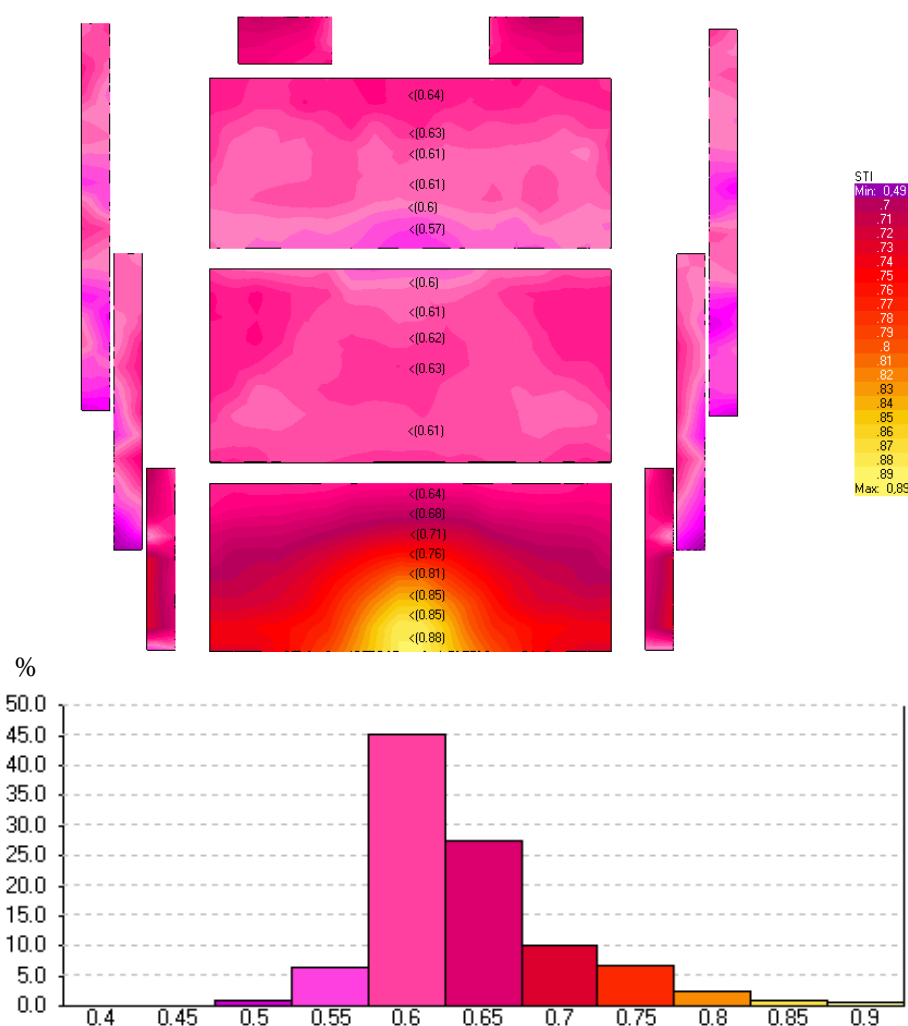


Figura 106. Valores de RASTI en las áreas de audiencia con la sala ocupada.

STI / RASTI	Valoración
0,75 – 1,00	Excelente
0,60 – 0,75	Muy buena
0,45 – 0,60	Buena
0,30 – 0,45	Regular
0,25 – 0,30	Pobre
0,00 – 0,25	Inaceptable

En la figura 106 se puede apreciar una mejora del parámetro RASTI respecto del análisis realizado con la sala vacía obteniendo un valor medio RASTI = 0,64 manteniéndose en el intervalo correspondiente a una calificación muy buena alcanzando su peor valor en los palcos. Por tanto, la valoración de la inteligibilidad de la sala se califica de muy buena para ambas condiciones de ocupación, mejorando el resultado cuando la sala está ocupada.

Tabla 27. RASTI sala ocupada.



8.7 Claridad de la palabra

Para el cálculo de la claridad se vuelve a emplear la fuente de 100 W omnidireccional por depender del recinto. C_{50} define la claridad de la energía sonora que llega al oyente utilizada para proyectar la inteligibilidad del habla, mostrando la proporción de energía antes y después de 50 ms. Es similar a ALCons pero utilizando un *split time*¹² seleccionado en la configuración de cálculo de 50 ms, sin influir en este caso el ruido de fondo.

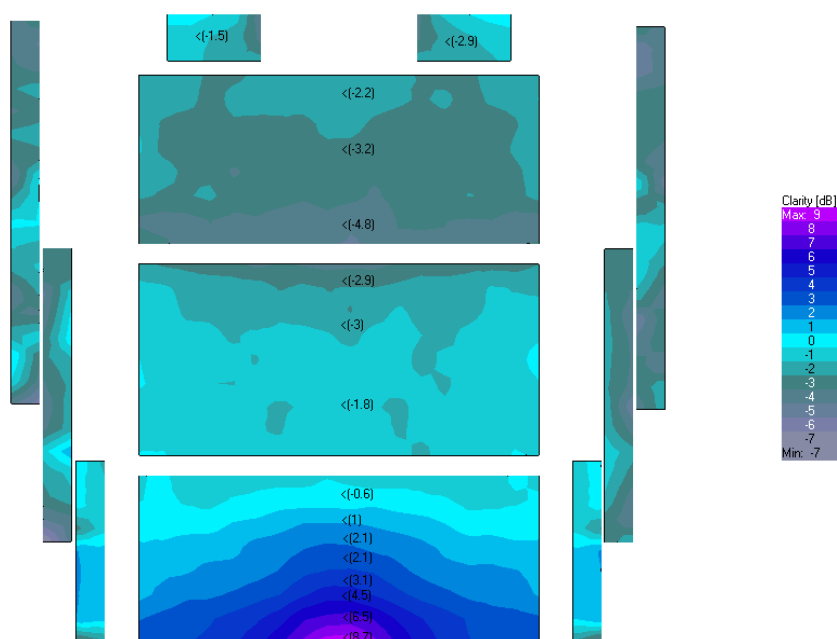


Figura 107. C_{50} para 125 Hz.

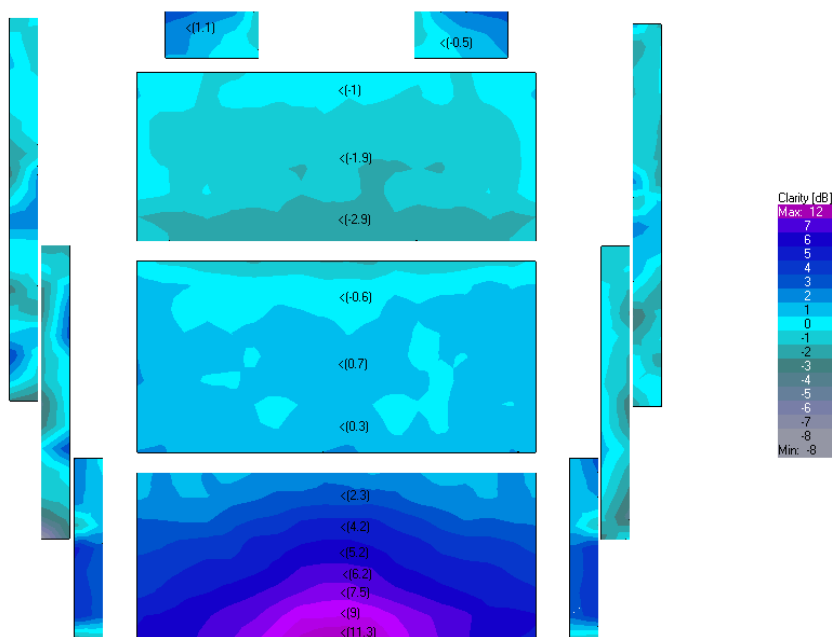


Figura 108. C_{50} para 1000 Hz.

¹² *Split time*: o división de tiempo, es el punto que usan los cálculos de inteligibilidad para separar la energía temprana de la energía lejana.



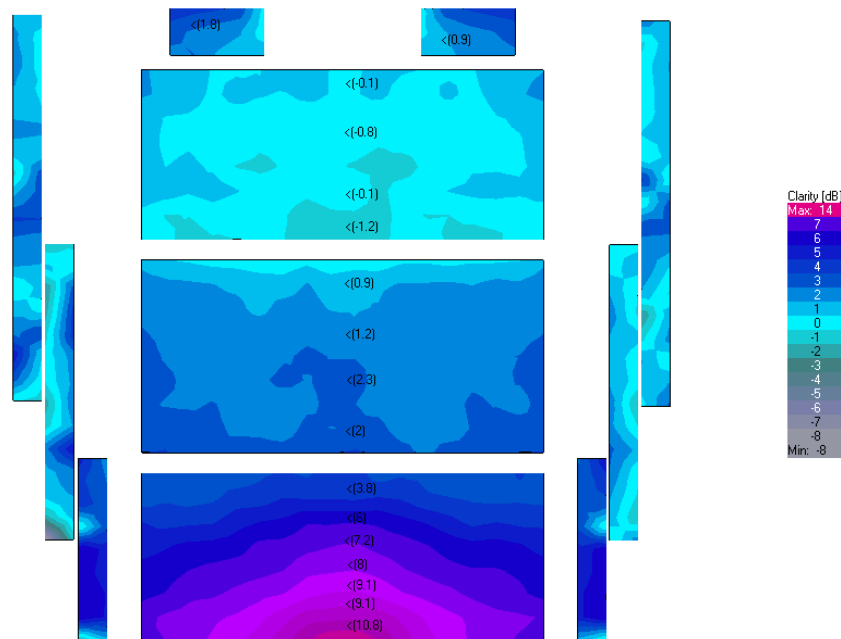


Figura 109. C_{50} para 5000 Hz.

Conforme aumenta la frecuencia los resultados obtenidos para la misma posición son mayores. Cualquier valor por encima de 0 dB en una sala con reverberación normal representa una buena inteligibilidad.

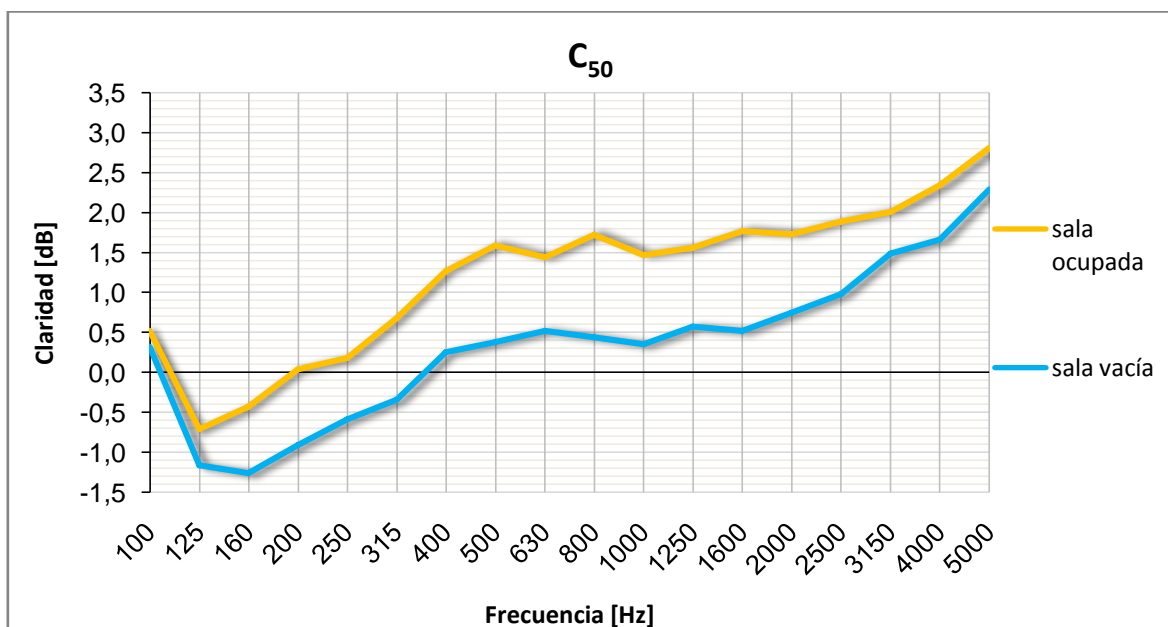


Figura 110. Espectro de la claridad C_{50} .

En baja frecuencia el valor de C_{50} se encuentra por debajo de 0 dB, superando este umbral en frecuencias medias. Para el espectro resultante el valor representativo *speech average*¹³ es de 0,79 dB con la sala vacía y 1,78 dB si está ocupada lo que representa una buena inteligibilidad del habla para este recinto.

¹³ *Speech Average*: valor global representativo del factor C_{50} , se calcula mediante la media de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.





8.8 Claridad musical

Para la simulación del cálculo de C_{80} se establecen las mismas condiciones de simulación expuestas para el cálculo de C_{50} , sin embargo este parámetro emplea un *split time* de 80 ms para predecir la articulación de diferentes tipos de música. En otras palabras, proporciona una visión de la interpretación musical de la sala.

A continuación se muestra la simulación de resultados de C_{80} , observando como a medida que aumenta la frecuencia los resultados obtenidos para la misma posición son mayores.

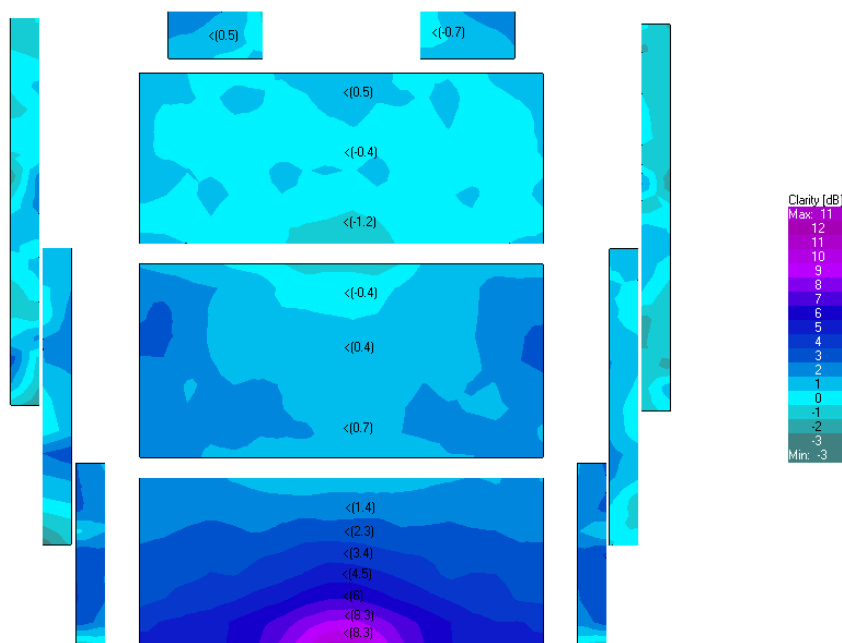


Figura 111. C_{80} para 125 Hz.

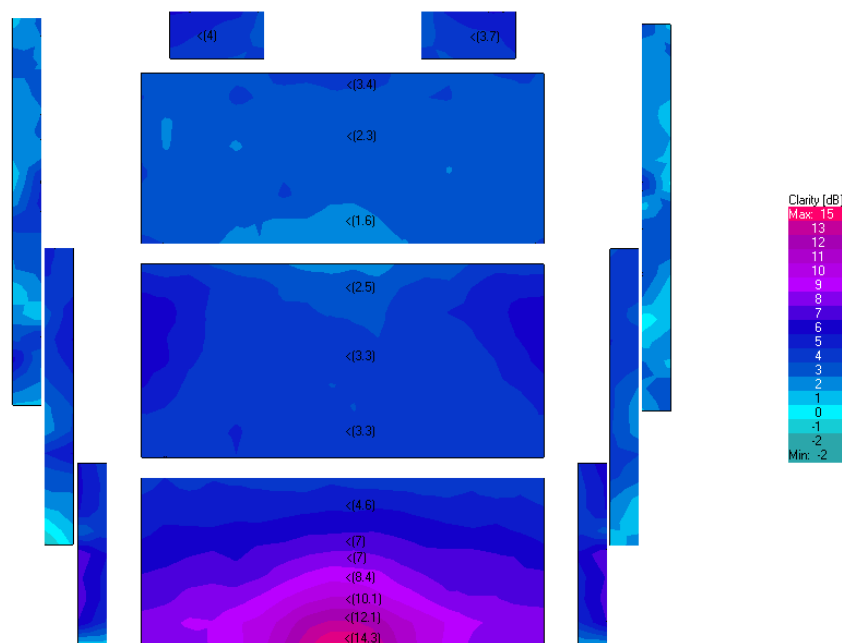


Figura 112. C_{80} para 1000 Hz.

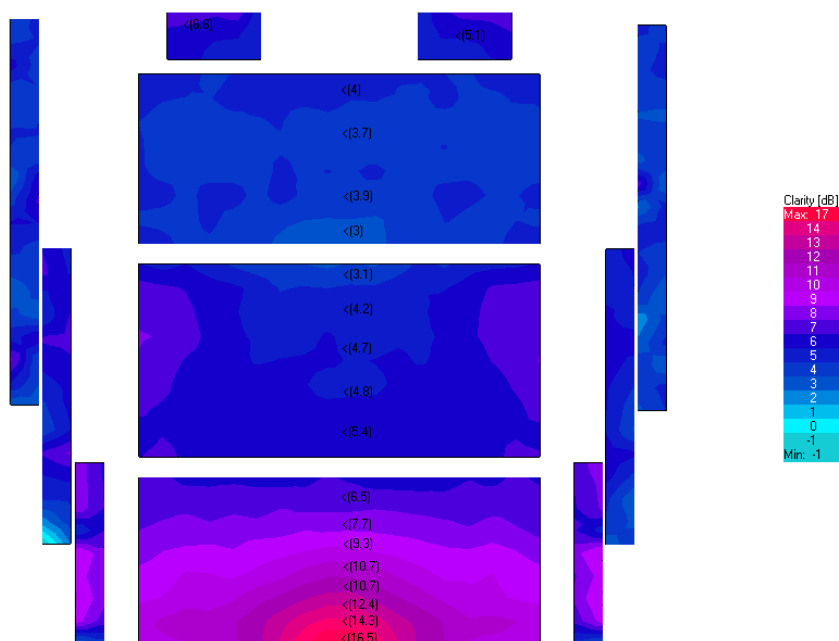


Figura 113. C_{80} para 5000 Hz.

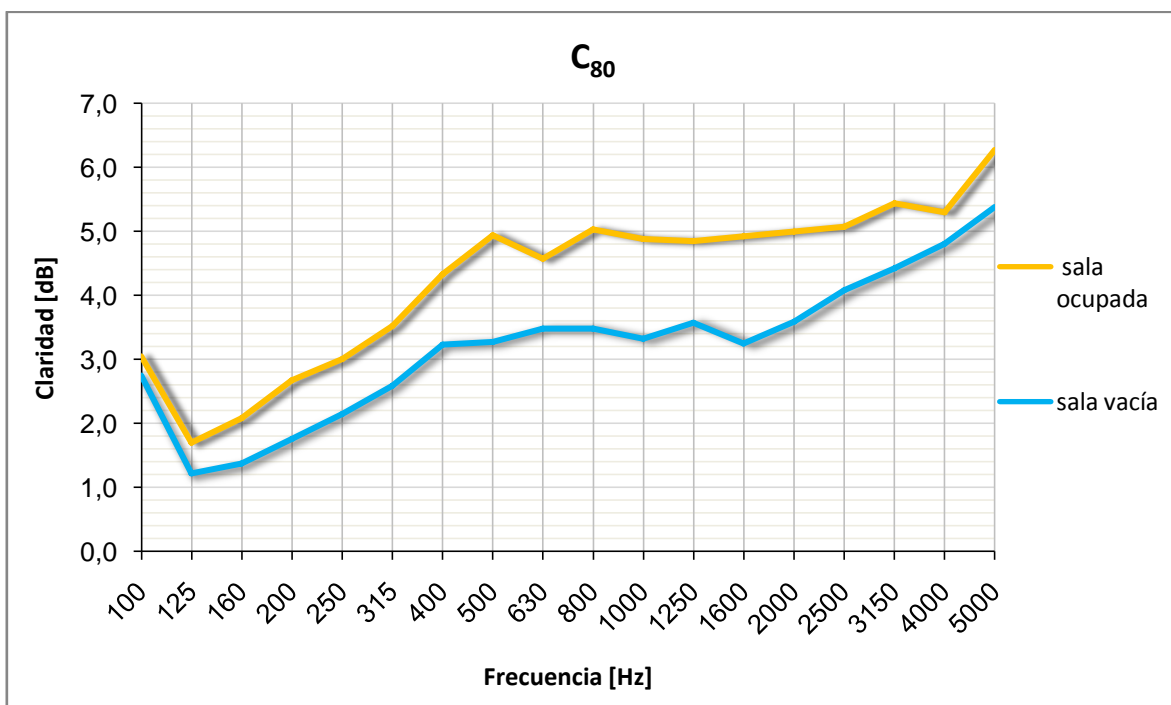


Figura 114. Espectro de claridad C_{80} .

C_{80}	Instrumento	Características
-2 dB – 0 dB	Viento	Tiempo de ataque y caída lenta.
-2 dB – 2 dB	Cuerda	Tiempo de ataque más rápido y caída lenta.
-2 dB – 4 dB	Cuerda pulsada	Tiempo de ataque rápido y caída más moderada.
-2 dB – 6 dB	Percusión	Tiempo de ataque y caída rápida.

Tabla 28. Valoración de C_{80} .





Tras analizar los resultados del espectro del nivel medio de parámetro C_{80} simulación se obtiene un valor representativo $C_{80} = 1,05$ dB con la sala vacía y $C_{80} = 1,55$ dB cuando está ocupada, por lo que se enfoca en función a los instrumentos indicados en la tabla 28.

8.9 Definición

Para las condiciones de simulación expuestas en el caso anterior, se realiza la medida del parámetro D obteniendo su proyección sobre las áreas de audiencia.

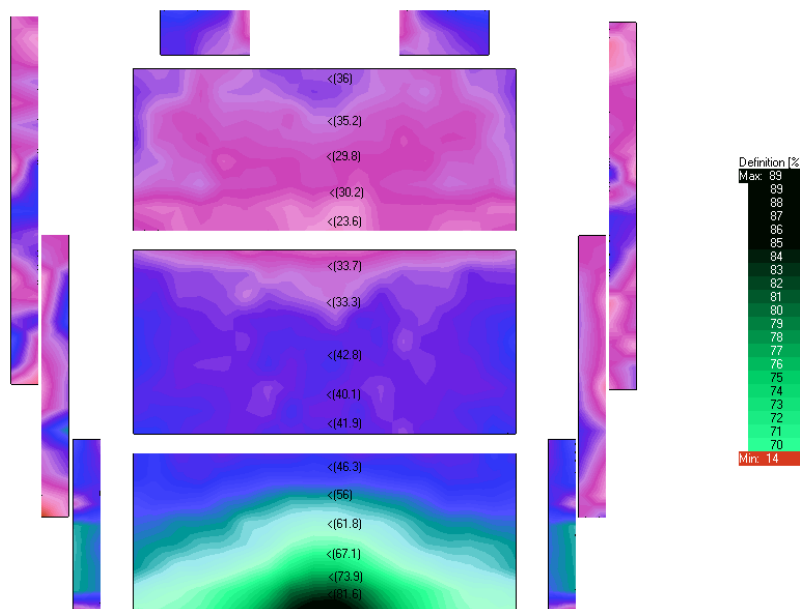


Figura 115. Definición para 125 Hz.

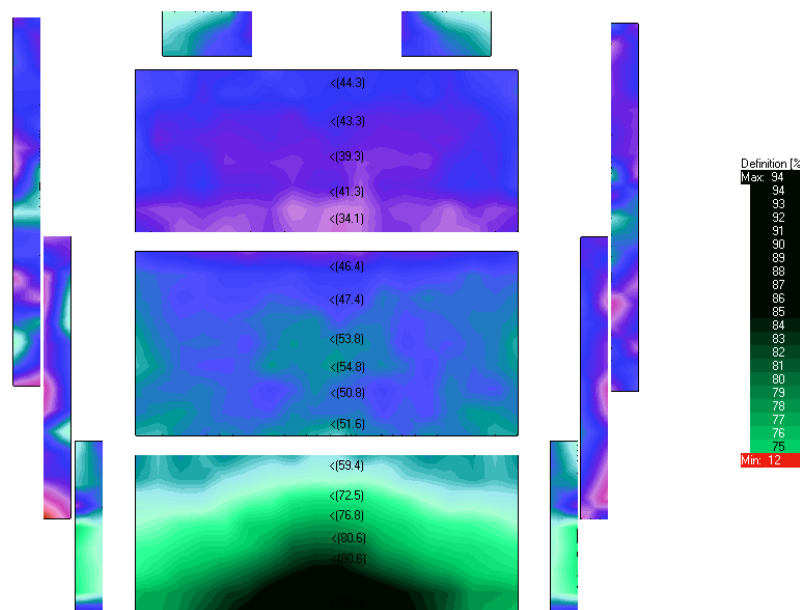


Figura 116. Definición para 1000 Hz.

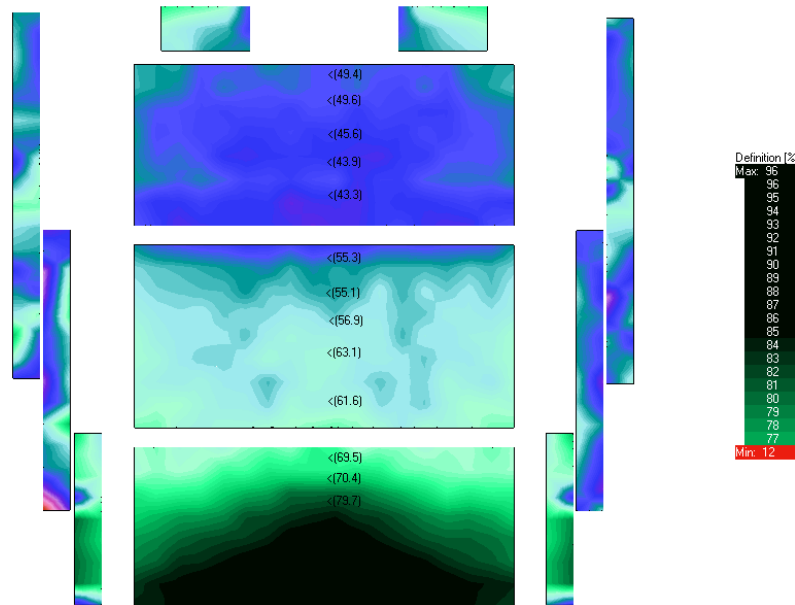


Figura 117. Definición para 5000 Hz.

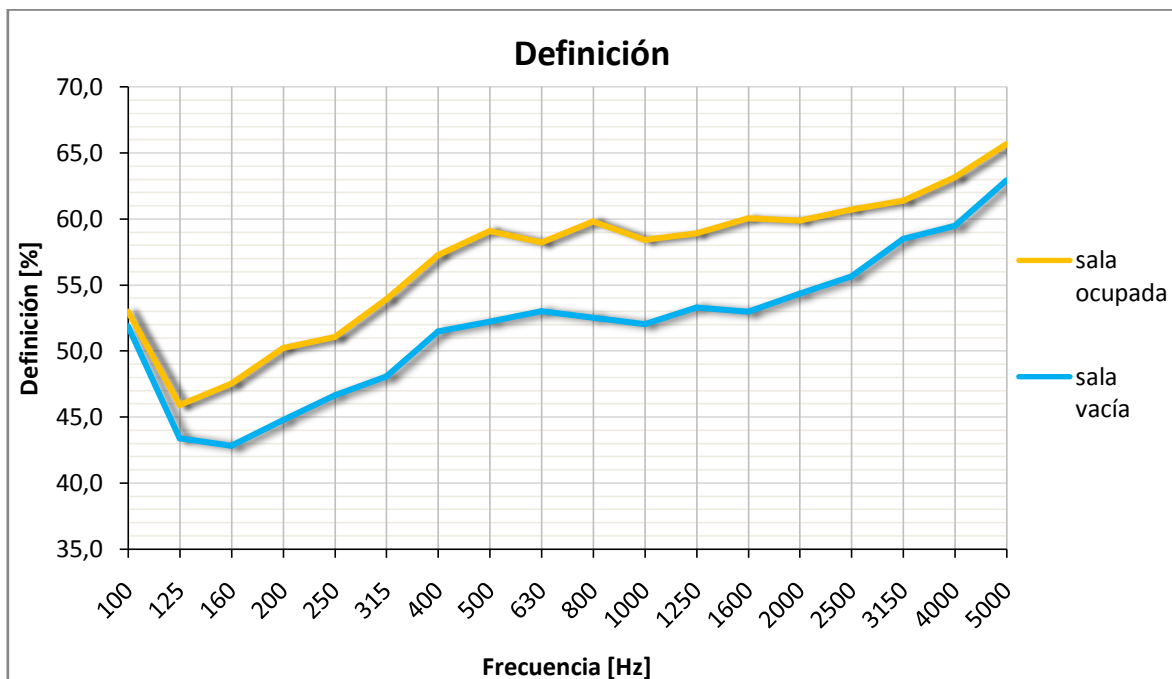


Figura 118. Definición.

Tanto en la proyección de valores representados en los mapas como en el espectro obtenido de la simulación, se puede apreciar como la definición aumenta en función de la frecuencia analizada, lo que se traduce en que cuanto más elevada sea, mayor será inteligibilidad de la palabra.

Sin embargo, para baja frecuencia el valor de la definición es más bajo, lo que refleja que en los primeros 50 ms la energía sonora reflejada es pequeña en relación con la energía reflejada total, por lo que a esas frecuencias el recinto es poco íntimo debido a que el tiempo de reverberación es más elevado, y por tanto la sala es más viva.





8.10 Eficiencia lateral

Para el cálculo de la Eficiencia Lateral (LF) se emplean las condiciones de simulación expuestas para el caso anterior siendo aplicable para la sala vacía.

A continuación se muestra la proyección de la relación existente entre la energía que llega lateralmente a un oyente y la recibida en todas las direcciones, dentro de la llegada de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo, quedando este excluido para evitar su efecto.

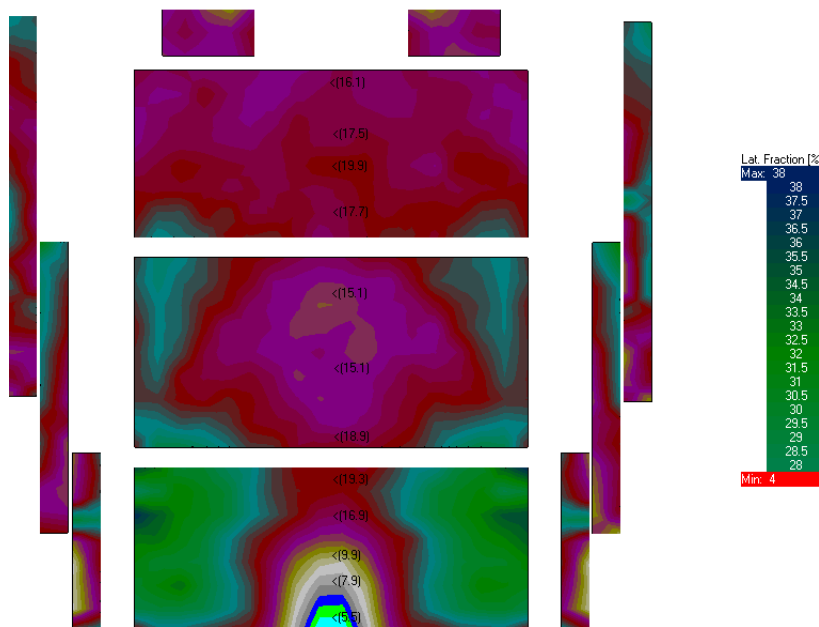


Figura 119. Eficiencia Lateral para 125 Hz.

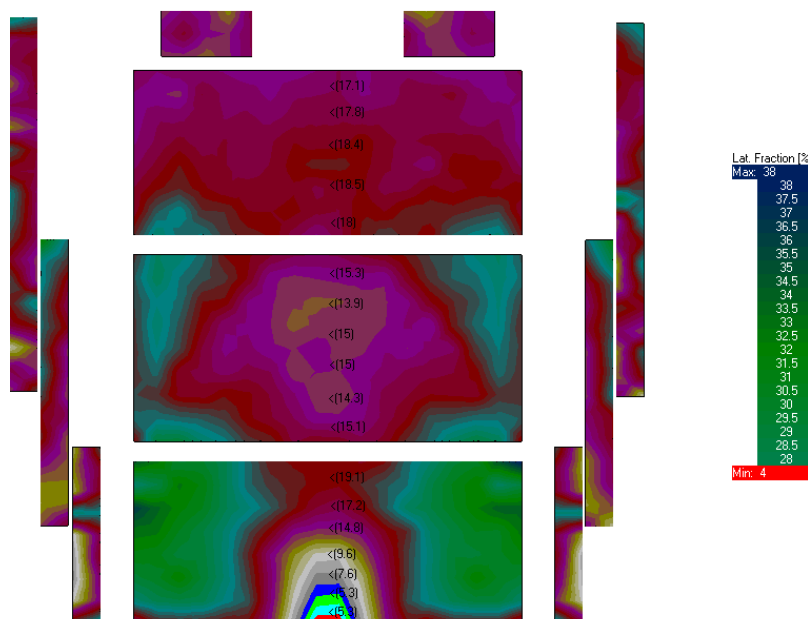


Figura 120. Eficiencia Lateral para 1000 Hz.

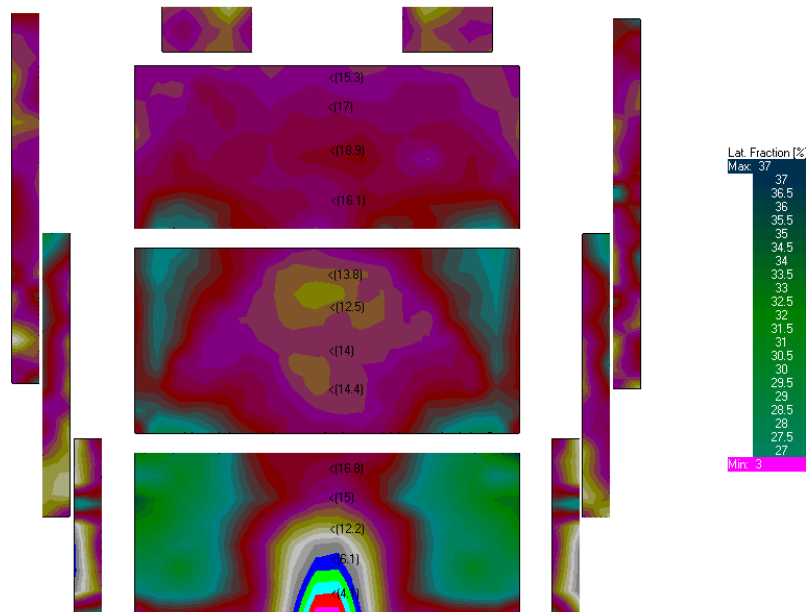


Figura 121. Eficiencia Lateral para 5000 Hz.

En la proyección sobre las áreas de audiencia la similitud de los mapas analizados a distintas frecuencias posee valores simétricos alrededor del eje central del auditorio.

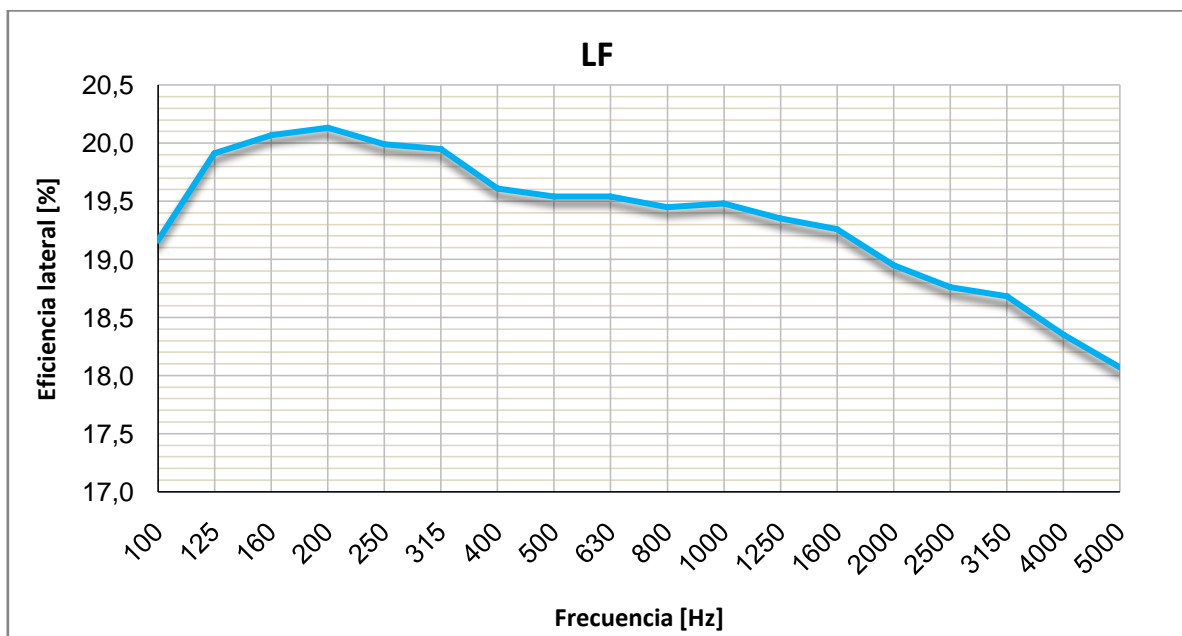


Figura 122. Eficiencia Lateral en función de la frecuencia.

Como se puede apreciar en la figura 118 y el porcentaje de LF disminuye conforme aumenta la frecuencia, obteniendo de esta forma un valor medio de $LF = 19,48\%$ encontrándose por encima del límite propuesto, por lo tanto se va a conseguir un grado de espacialidad del sonido deseado. Este resultado se debe al diseño de las paredes laterales del recinto, disminuyendo el riesgo de que se generen fuertes reflexiones, mejorando la eficiencia lateral y la sonoridad, evitando focalizaciones y ecos.





8.11 Auralización

La auralización es el proceso que permite convertir los datos acústicos y electroacústicos en una señal de audio que podrá ser escuchada para su evaluación, de esta forma se podrá comparar de forma práctica los resultados de escucha en diferentes zonas del recinto.

El primer paso para la auralización es la creación del reflectograma, en este caso se ha realizado mediante el método de cálculo *Aura*¹⁴, ya que este proceso de cálculo añade la cola de reverberación teniendo en cuenta la dispersión y el sonido reverberante. De esta forma, el ecograma obtenido aumentará su densidad con el tiempo de manera que caracterice del mejor modo posible al recinto.

Para su evaluación se han seleccionado 3 puntos de escucha del recinto caracterizados en función de su distancia a la fuente, eligiendo uno próximo y otro más alejado.

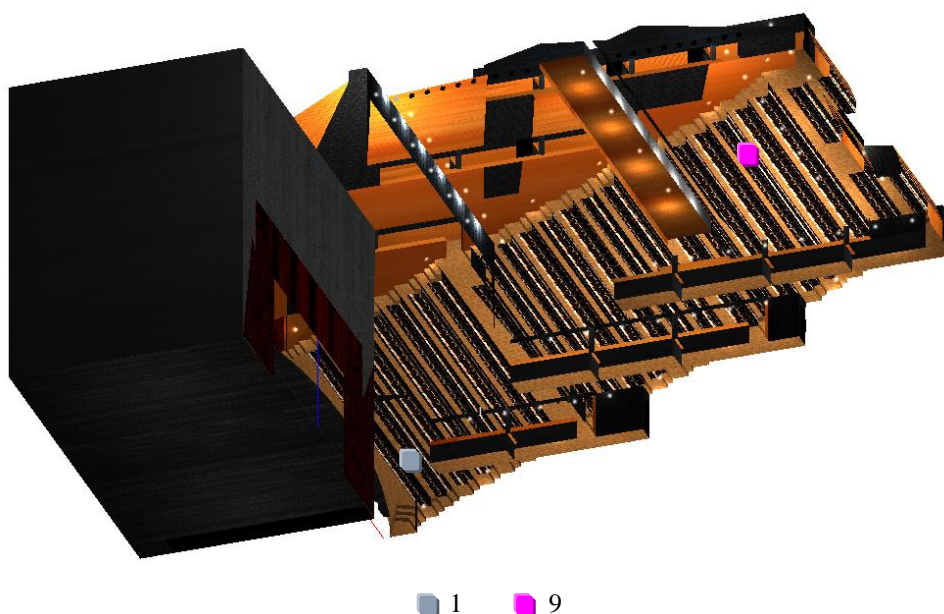


Figura 123. Posiciones de los puntos de escucha para auralización.

Tras la creación del reflectograma de cada punto analizado, mediante el módulo de escucha *Ears* de EASE, se realiza la convolución de la respuesta al impulso baural obtenida anteriormente con un archivo de sonido de entrada que no posee reverberación, para producir un archivo de sonido que incluye la respuesta del recinto.

Las muestras de sonido utilizadas para la evaluación de la respuesta que ofrece la sala ante la entrada de un archivo de audio son de voz y música, de forma que se pueda apreciar el resultado para el tipo de emisión al que se destina el Teatro Tomás y Valiente. Para ello se analiza la respuesta de la sala cuando se encuentra vacía y cuando se encuentra ocupada permitiendo analizar las diferencias entre ambas situaciones, comprobando la mejora del habla cuando la sala está ocupada y cómo empeora en un punto más alejado de la fuente.

¹⁴ **Respuesta *Aura*:** permite obtener la respuesta al impulso con un orden de reflexión y con una longitud de tiempo mayor que el método de **Trazado de Rayos** de EASE.

CAPÍTULO IX



CONCLUSIONES



9. CONCLUSIONES

Tras la realización de medidas *in situ*, su posterior comparación con el calculado mediante la simulación de resultados se obtiene el siguiente resumen de conclusiones extraídas tras el análisis de los parámetros acústicos.

Realizadas las medidas *in situ* de ruido de fondo tanto para condiciones de ventilación encendida como apagada, se ha comprobado que la desviación entre los resultados de ambas condiciones es mínima, por lo que la molestia del ruido producido en la sala no proviene de los sistemas de ventilación. Como se pudo comprobar en el momento de la medida tampoco provenía de fuentes exteriores al recinto, sino de fuentes de ruido interior como son la maquinaria escénica e iluminación. Para ello se propone la mejora de estos sistemas, de forma que se pueda reducir la molestia siseante que producen.

Uno de los problemas que posee la sala son los palcos, desde los que la visibilidad del escenario y la calidad sonora es peor, pudiendo aprovechar su presencia como espacios acoplados al recinto que influyen en la amplificación del sonido dotándolo de una mayor riqueza. Los objetivos de calidad acústica propuestos para la sala son valores recomendados por Antoni Carrión Isbert [1] y otros autores, mostrándose en la siguiente tabla los obtenidos en la simulación.

Sala	Parámetro	Objetivo	Calculado	Valoración
Vacía	T _{mid} palabra	1 – 1,2 s	1,08 s	Muy bueno
	T _{mid} música	1,2 – 1,5 s	1,08 s	Aceptable
	ALcons	3 – 7 %	6,81 %	Muy bueno
	RASTI	0,6 - 0,75	0,60	Muy bueno
	Definición (D)	> 50 %	52 %	Bueno
	Claridad de la palabra (C ₅₀)	> 0 dB	0,79 dB	Bueno
	Claridad de la música (C ₈₀)	-4 – 0 dB	1,05 dB	Regular
	Eficiencia lateral (LF)	>19%	19,48 %	Muy bueno
Ocupada	T _{mid} palabra	1 - 1,2 s	1,01 s	Bueno
	T _{mid} música	1,2 – 1,5 s	1,01 s	Aceptable
	ALcons	3 – 7 %	5,62 %	Muy bueno
	RASTI	0,6 - 0,75	0,64	Muy bueno
	Definición (D)	> 50 %	57,4%	Muy bueno
	Claridad de la palabra (C ₅₀)	> 0 dB	1,78 dB	Muy bueno
	Claridad de la música (C ₈₀)	-2 – 2 dB	1,55 dB	Bueno
	Brillo (Br) palabra	0,9 – 1,2 s	1,03 s	Muy bueno
	Brillo (Br) música	> 0,87 s	1,03 s	Bueno
	Calidez (BR) palabra	0,9 – 1,2 s	1,34 s	Aceptable
	Calidez (BR) música	1,1 – 1,45 s	1,34 s	Muy bueno

Tabla 29. Valoración final de los parámetros acústicos analizados en el proyecto.





Tras la comparación de medidas experimentales y simuladas del tiempo de reverberación el valor objetivo propuesto para el promediado entre las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz se ajusta a exigencias de calidad propuestas para la palabra tanto para la sala vacía como ocupada al 90%. Sin embargo se considera bajo para una emisión de tipo musical.

En los valores referentes a inteligibilidad, tras la simulación se ha podido apreciar como el resultado de la sala ante condiciones de emisión reales, como es la voz humana, el recinto tenía una respuesta media calificada como muy buena, obteniendo los peores resultados en los palcos, manteniéndose esta valoración para ambas condiciones de ocupación de la sala, mejorando los índices ALCons y RASTI cuando la sala se encuentra ocupada respecto de la sala vacía, del mismo modo que ocurre con el parámetro definición, ajustándose a los criterios objetivos propuestos.

Tras la simulación de los parámetros de claridad se obtienen resultados buenos para la claridad de la palabra con la sala vacía. Sin embargo la valoración obtenida para la claridad musical no se ajusta a los objetivos de calidad acústica propuestos para sala vacía. Sin embargo cuando la sala se encuentra ocupada estos parámetros mejoran ya que están comprendidos dentro del intervalo objetivo propuesto de calidad acústica.

La eficiencia lateral obtenida se encuentra por encima del objetivo propuesto, por lo que se consigue un buen grado de espacialidad del sonido deseado.

El parámetro de Brillo calculado indica que la sala simulada posee una respuesta muy buena a altas frecuencias para la emisión de voz, cumpliendo la condición de brillo óptimo para la emisión musical. Por tanto, el sonido de la sala será claro y rico en armónicos, lo cual beneficia las actuaciones en directo de bandas de música. Aún así el brillo no se encuentra por debajo de 1 s que es la recomendación de algunos autores.

La calidez acústica obtenida es un valor que se encuentra por encima del intervalo recomendado para la palabra, sin embargo la valoración es aceptable ya que no difiere en más de 0,14 dB siendo mejor el resultado obtenido para una emisión musical. Esto indica que la sala tendrá riqueza en sonidos graves, siendo la respuesta de la sala a baja frecuencia muy buena para la música.

Según los resultados obtenidos de las simulaciones, se puede afirmar que la sala proyectada se encuentra dentro de los márgenes deseados de los parámetros acústicos objetivos estipulados para la palabra. Siendo el resultado de estos parámetros más deficiente para la emisión musical, resultando óptimo para representaciones musicales de percusión, música de cámara y ópera.

Por tanto se puede concluir que el Teatro Tomás y Valiente objetivo de este estudio cumple con las condiciones de acondicionamiento acústico para el uso principal al que está destinado, la palabra, ajustándose sus parámetros a los óptimos establecidos para este uso, no siendo necesaria una mejora en su acondicionamiento acústico para el uso musical que empeore estas características.



PRESUPUESTO



10. PRESUPUESTO

En este capítulo se muestra el estudio de viabilidad económica resultante de la duración correspondiente a la realización del proyecto y el alquiler de los equipos y material necesario para la realización de las medidas, realizando la división en capítulos que se muestra a continuación.

CAPÍTULO C01 REALIZACIÓN DEL PROYECTO				
CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
1.01	H ING. TEC. EN MEDIDAS C/ METRO LÁSER Tiempo empleado por Ingeniero Técnico en toma de medidas con metro láser.	12,00	25,00	300,00
1.02	H AYTE. EN MEDIDAS C/ METRO LÁSER Tiempo empleado por ayudante en toma de medidas con metro láser.	12,00	15,00	180,00
1.03	H ING. TEC. EN DISEÑO DEL MODELO INFORMÁTICO Tiempo empleado por Ingeniero Técnico en diseño del modelo informático, inclusive asignación de materiales y texturas.	126,00	25,00	3.150,00
1.04	H ING. TEC. EN CÁLCULOS DE LAS MEDIDAS IN SITU Tiempo empleado por Ingeniero Técnico en la realización de cálculos de las medidas <i>in situ</i> .	40,00	25,00	1.000,00
1.05	H ING. TEC. EN SIMULACIÓN MEDIDAS PROGRAMA INFORMÁTICO Tiempo empleado por Ingeniero Técnico en simulación de las medidas del programa informático.	45,00	25,00	1.125,00
1.06	H ING. TEC. EN ELABORACIÓN DE LA MEMORIA Tiempo empleado por Ingeniero Técnico en la elaboración de la memoria.	100,00	25,00	2.500,00
TOTAL CAPÍTULO C01 REALIZACIÓN DEL PROYECTO				8.255,00





CAPÍTULO C02 UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE MEDIDA				
CODIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
2.01	DÍA UTILIZACIÓN FUENTE DODECAÉDRICA OMNIDIRECCIONAL DO-12 Utilización fuente sonora dodecaédrica con proyección omnidireccional, incluido trípode.	2,00	34,00	68,00
2.02	DÍA UTILIZACIÓN AMPLIFICADOR DE POTENCIA M-700 Utilización de amplificador de potencia M-700.1, 1500 w, 700 rms, monoblock.	2,00	28,50	57,00
2.03	DÍA UTILIZACIÓN MICRÓFONO GRAS 40 AF Utilización de micrófono G.R.A.S. modelo 40AF de ½" de condensador de polarización externa, 50 mV/PA, 14-146 dB, incluido pìde de micrófono.	2,00	6,00	12,00
2.04	DÍA UTILIZACIÓN PREAMPLIFICADOR GRAS 26 AK Utilización de preamplificador G.R.A.S. modelo 26AK de ½" con conectores Lemo de 7 pines	2,00	3,50	7,00
2.05	DÍA UTILIZACIÓN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE MEDIDA SYMPHONIE Utilización de sistema de adquisición de medidas Symphonie de 01 dB.	5,00	600,00	3.000,00
2.06	MES UTILIZACIÓN ORDENADOR PORTÁTIL Utilización de ordenador portátil DELL modelo Vostro 1710.	3,00	100,00	300,00
2.07	DÍA UTILIZACIÓN CABLE CONECTOR SPEAK ON Utilización cable de conectores Speakon.	2,00	1,50	3,00
2.08	DÍA UTILIZACIÓN CABLE CONECTOR LEMO Utilización cable conectores Lemo 7 pines.	6,00	2,00	12,00
2.09	DÍA UTILIZACIÓN CALIBRADOR CAL01 Utilización sistema de verificación de medida de 01 dB modela Cal01.	2,00	5,00	10,00
2.10	DÍA UTILIZACIÓN CABLE CONECTOR XLR Utilización cable con conectores Canon o XLR.	2,00	0,35	0,70
2.11	DÍA UTILIZACIÓN SOFTWARE SIMULACIÓN ELECTROACÚSTICA Utilización de software de simulación electroacústica de recintos EASE 4.3	2,00	34,00	68,00
TOTAL CAPÍTULO C02 UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE MEDIDA				3.527,70



RESUMEN DE PRESUPUESTO		
CAPÍTULO	RESUMEN	EUROS
1	REALIZACIÓN DEL PROYECTO Presupuesto parcial del tiempo empleado en la realización del proyecto.	8.225,00
2	UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE MEDIDA Presupuesto parcial correspondiente al alquiler de los equipos de medida.	3.527,70
TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL		11.782,70
21,00% I.V.A.		2.474,37
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		14.257,07

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de CATORCE MIL DOSCIENTOS CINCUENTA Y SIETE EUROS con SIETE CÉNTIMOS.

Fuenlabrada, a 16 de julio de 2013.

El Técnico redactor del Proyecto

Cristina Herranz Macías





BIBLIOGRAFÍA

- [1] Antoni Carrión Isbert, “Diseño de espacios arquitectónicos”. Ediciones UPC, 1998.
- [2] Manuel Recuero López, “Acondicionamiento acústico”. Paraninfo, 2001.
- [3] Lothar Cremer and Helmut A. Müller, “Principles and Applications of room acoustics”. Volume I. Michigan University, 2007.
- [4] Constantino Gil González, “Introducción a las salas para la palabra”. Dpto. de publicaciones de la E.U.I.T. de Telecomunicación, 2010.
- [5] Higini Arau, “ABC de la acústica arquitectónica”. Ediciones CEAC, 1999.
- [6] Manuel Vázquez Rosado, “Estudio acústico de las aulas abovedadas en el edificio Sabatini de la Universidad Carlos III de Madrid”. Proyecto Fin de Carrera, 2011.
- [7] Manuel Recuero López, “Acústica arquitectónica aplicada”. Paraninfo, 1999.
- [8] Kuttruff, H., “Rooms Acoustics”. Elsevier Applied Science, London, 1991.
- [9] Blauert, J., “Spatial Hearing”, The MIT Press, Cambridge, London, England, 1983.
- [10] Moreno, A. y Pfitzschner, J., “Human Head Directivity in Speech Emission: a new approach”. Acoustic Letter, 1977.
- [11] Ivana Rossell Turull, “Parámetros para la valoración acústica de una sala”. Universitat Ramon Lull, La Salle, 2008.
- [12] Beranek LL., “Acoustics”, McGraw-Hill, 1954.
- [13] Peutz, V.M.A., “Articulation Loss of Consonants as a Basis for the Design and Judgment of Sound Reinforcement Systems”. J. Audio Engineer Soc., Volume 19, 1971.
- [14] Blazier W. E., “RC Mark II: A Refined Procedure for Rating the Noise of heating, Ventilating and Air-conditioning (HVAC) Systems in Buildings”. J. Noise Control Engineering, 1997.
- [15] Beranek LL., “Application of NCB noise criterion curves”. AM Rating and Assessment of noise, 1989.
- [16] Ivana Rossell Turull, “Requisitos Acústicos para salas destinadas a reproducción de voz”. Universitat Ramon Lull, La Salle, 2009.
- [17] Higini Arau, “Auditorios del Siglo XXI”. Tecni Acústica, Terrasa, 2005.
- [18] Universidad Politécnica de Madrid, “Medida del tiempo de reverberación por el método del ruido interrumpido”, <http://www.youtube.com/watch?v=buDCgB9b9d4>
- [19] Renkus Heinz, “EASE Version 4.3 User’s guide & Tutorial”. Acoustics Design Ahnert, Germany, 2009.





Planta edificio.



PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UN CENTRO CULTURAL EN PUERTALLANA

PLANO DE DISTRIBUCIÓN DE LA OBRA

LEYENDA:

- SEÑALIZACION DE SEGURIDAD
- PUERTAS DE EMERGENCIA
- PUERTAS DE EMERGENCIA CON RESERVA

DETALLE DE LA OBRA:

018 - MAG - 103



Planta primera. Edificio.

